

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR



FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN REDES DE COMUNICACIÓN

“ESTUDIO TÉCNICO COMPARATIVO DE LAS TECNOLOGÍAS LONG TERM EVOLUTION – LTE Y LTE ADVANCED”

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCION DEL TÍTULO DE:

MASTER EN REDES DE COMUNICACIÓN

AUTOR

KURI MALLKU YUPANKI CHELA

DIRECTOR

DR. GUSTAVO CHAFLA

Quito, diciembre 2016

AGRADECIMIENTO

Mi más sincero agradecimiento a quienes me apoyaron y colaboraron en el desarrollo del presente proyecto. Gracias mi Dios por guiarme, ampararme e iluminarme en mi vida; tu eres y serás quién nos guíes con tu amor y alegría; gracias también a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador por habernos dado la formación necesaria para realizar el presente proyecto, al Doctor Gustavo Chafra quién en mi caso particular me incentivó a ingresar a la maestría, fue docente en la maestría y a la vez tutor de la presente Tesis, brindándome sus conocimientos y guiándome en el desarrollo del trabajo realizado.

Mi reconocimiento primordial a mi querida esposa Nancy, quién estuvo junto a mi apoyándome constantemente en el desarrollo de este trabajo; eres y serás un pilar importante en mi vida. A mi adorado hijito (Kuri) quién fue la motivación fundamental y me incentivo aún más para alcanzar esta meta.

Así mismo, mi agradecimiento a mis seres queridos: Tránsito, Atik, Patty, Joffre, mis adorados sobrinos (Camila y Dannes), mamita Marcela, José y María; quienes son el combustible y esa energía que me motiva a alcanzar nuevos sueños y metas.

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a mi querida esposa y mi adorado hijo, quienes me brindan mucho cariño, amor y alegría; a mi abuelita Marcelita, por haberme formado con sus valores y principios, haberme dado su amor y cariño en mi niñez; a mi madre Chanito por enseñarme a ser perseverante y de esta manera alcanzar las metas que me he planteado; a mi hermana Patty por estar junto a mí en cada etapa de nuestras vidas y por darme sus sabios consejos; a mi hermano Joffre por alcanzar un sueño compartido; a mis adorados sobrinos Cami y Dannes.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTO.....	I
DEDICATORIA.....	I
ÍNDICE DE CONTENIDOS	II
RESUMEN	V
ABSTRACT	V
INTRODUCCIÓN	VI
JUSTIFICACIÓN	VIII
ANTECEDENTES	IX
OBJETIVOS	XI
OBJETIVO GENERAL.....	XI
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	XI
CAPÍTULO 1	1
CUARTA GENERACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE TELEFONÍA MOVIL.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. EVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA MÓVIL ^{[5] – [10]}	2
1.2.1. PRIMERA GENERACIÓN “1G”	2
1.2.2. SEGUNDA GENERACIÓN “2G”	3
1.2.3. SEGUNDA GENERACIÓN Y MEDIA “2.5G”	3
1.2.4. TERCERA GENERACIÓN “3G”	4
1.2.5. CUARTA GENERACIÓN “4G”	5
1.3. TECNOLOGÍAS DE LA TELEFONÍA MÓVIL ^{[11] – [12]}	5
1.3.1. SISTEMA AVANZADO DE TELEFONÍA MÓVIL – AMPS.....	6
1.3.2. SISTEMA GLOBAL DE COMUNICACIONES MÓVILES – GSM	8
1.3.3. ACCESO MÚLTIPLE POR DIVISIÓN DE CÓDIGO – CDMA.....	10
1.3.4. SERVICIO GENERAL DE PAQUETES POR RADIO – GPRS.....	10
1.3.5. SISTEMA UNIVERSAL DE TELECOMUNICACIONES MÓVILES – UMTS.....	12
1.3.6. ACCESO MÚLTIPLE POR DIVISIÓN DE CÓDIGO 2000 – CDMA 2000.....	13
1.4. CONCLUSIÓN	14
CAPÍTULO 2	15
LONG TERM EVOLUTION – LTE.....	15

2.1.	INTRODUCCIÓN	15
2.2.	ARQUITECTURA DEL SISTEMA LTE ^{[13] – [18], [21]}	16
2.2.1.	ARQUITECTURA DE E-UTRAN	18
2.2.2.	ARQUITECTURA DE LA RED TRONCAL DE PAQUETES EVOLUCIONADA (ENVOLVED PACKET CORE – EPC).....	30
2.2.3.	IP MULTIMEDIA SUBSYSTEM (IMS)	47
2.2.4.	EQUIPO DE USUARIO ^{[13], [21]}	48
2.3.	GESTIÓN DE SESIONES, MOVILIDAD Y SEGURIDAD EN LTE ^{[13], [19]-[21]}	50
2.4.	TECNOLOGÍAS DE NIVEL FÍSICO ^{[13], [21]-[24]}	59
2.4.1.	Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)	60
2.4.2.	Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA).....	64
2.4.3.	Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA)	66
2.4.4.	OFDMA vs SC-FDMA.....	66
2.4.5.	Multiple Input Multiple Output (MIMO).....	68
2.5.	INTERFAZ RADIO DEL SISTEMA LTE ^{[13], [21], [26]-[27]}	75
2.5.1.	Pila de protocolos, canales lógicos y canales de transporte	77
2.5.2.	Capa Física	82
2.6.	GESTIÓN DE RECURSOS RADIO – RADIO RESOURCE MANAGEMENT (RRM) ^{[13], [21], [28]- [30]}	92
2.6.1.	Control de admisión radio – Radio Admission Control (RAC)	92
2.6.2.	Control de servicios portadores radio – Radio Bearer Control (RBC)	93
2.6.3.	Scheduling de paquetes	93
2.6.4.	Inter-Cell Interference Coordination ICIC.....	96
2.6.5.	Control de la movilidad	96
2.6.6.	Balanceo de carga	99
2.6.7.	Control de potencia.....	99
2.7.	CONCLUSIÓN	99
CAPÍTULO 3		100
LONG TERM EVOLUTION ADVANCED – LTE ADVANCED		100
3.1.	INTRODUCCIÓN ^{[13], [21], [31]}	100
3.1.1.	Bandas de Frecuencia de LTE-A ^{[13], [21], [32]-[33]}	100
3.1.2.	Arquitectura de LTE-A	101
3.1.3.	Características de LTE-A ^{[13], [21], [34]-[35]}	102
3.2.	TÉCNICAS DE MÚLTIPLES ANTENAS PARA LTE ADVANCED ^{[13], [21], [36], [41], [42]}	104
3.2.1.	MIMO mejorado en LTE Advanced	104
3.2.2.	MIMO en el enlace de bajada de LTE Advanced	104

3.2.3.	MIMO en el enlace de subida de LTE Advanced	106
3.3.	(CoMP) COORDINATED MULTIPOINT TRANSMISSION AND RECEPTION ^{[13], [21], [36], [43]} - [45]	107
3.3.1.	Enlace de bajada en LTE CoMP	109
3.3.2.	Enlace de subida en LTE CoMP	109
3.4.	RELAYING ^{[13], [21], [36], [46] - [49]}	110
3.4.1.	Escenarios de Despliegue	112
3.4.2.	Tipos de Relay Nodes	113
3.5.	CONCLUSIÓN	113
CAPÍTULO 4		114
TECNOLOGÍA LONG TERM EVOLUTION – LTE VS LTE ADVANCED		114
4.1.	INTRODUCCIÓN	114
4.2.	COMPARACIÓN TECNOLÓGICA ^{[13], [21], [36], [50] - [51]}	114
4.3.	COMPARACIÓN DE BANDAS DE FRECUENCIA ^{[13], [21], [36], [52] - [58], [61]}	117
4.4.	COMPARACIÓN DE LA ARQUITECTURA DE RED ^{[13], [21], [36], [52] - [58]}	120
4.5.	COMPARACIÓN DE LA CAPA FÍSICA ^{[13], [21], [36], [52] - [58]}	129
4.6.	COMPARACIÓN DE LOS ESQUEMAS DE MODULACIÓN ^{[13], [21], [36], [52] - [58]}	133
4.7.	COMPARACIÓN DE LA VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN Y LA EFICIENCIA ESPECTRAL ^{[13], [21], [36], [52] - [58]}	137
4.7.1.	VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN PROMEDIO	137
4.7.2.	EFICIENCIA ESPECTRAL PROMEDIO Y EN EL BORDE DE LA CELDA	140
4.8.	COMPARACIÓN DE TÉCNICAS DE MÚLTIPLES ANTENAS ^{[13], [21], [36], [52] - [57]}	142
4.9.	COMPARACIÓN DE CATEGORIAS DE EQUIPO DE USUARIO ^{[13], [21], [36], [52] - [58]}	144
4.10.	COMPARACIÓN DE SERVICIOS Y APLICACIONES ^{[13], [21], [36], [52] - [58]}	146
4.11.	COMPARACIÓN DE REDES DESPLEGADAS Y LANZAMIENTO COMERCIAL ^{[13], [21], [36], [52] - [60]}	148
4.12.	CONCLUSIONES	150
CAPÍTULO 5		152
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		152
5.1.	CONCLUSIONES	152
5.2.	RECOMENDACIONES	155
BIBLIOGRAFÍA		157

RESUMEN

El presente trabajo de investigación presenta el análisis técnico comparativo entre las tecnologías denominadas de cuarta generación como lo son Long Term Evolution – LTE y LTE Advanced. LTE ha sido implementado y se encuentra funcionando en nuestro país desde diciembre del año pasado en las ciudades de Quito y Guayaquil; es por ello la importancia en realizar el estudio comparativo entre estas tecnologías y de esta manera nos permita analizar y entender el conjunto de procesos y procedimientos tecnológicos que implica implementar estas tecnologías.

La implementación de estas tecnologías como uno de sus principales objetivos es mitigar el problema de la saturación del espectro radioeléctrico y fundamentalmente de ofrecer nuevos servicios tales como: transferencia de video en tiempo real, Internet con velocidad similar al de una red de área local de tal manera que permita una eficiente comunicación entre varios dispositivos que forman parte de nuestra vida cotidiana.

Palabras Clave: LTE, LTE Advanced, Tecnologías 4G.

ABSTRACT

This research paper presents a technical analysis comparative between the fourth generation technologies such as Long Term Evolution - LTE and LTE Advanced. LTE has been implemented and is operating in our country since December last year in the cities of Quito and Guayaquil; It is thus important to conduct a comparative study between these technologies and thus allow us to analyze and understand the set of processes and technological procedures involved to implement these technologies.

The implementation of these technologies as one of its main objectives is to mitigate the problem of saturation of the spectrum and mainly offer new services such as video transfer in real time, similar to the Internet with a local area network speed such way that allows efficient communication between computers and electronic equipment at office and home.

Keywords : LTE , LTE Advanced, 4G technologies .

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo presenta un estudio técnico comparativo entre las tecnologías Long Term Evolution – LTE y LTE Advanced, de tal manera que permita realizar una comparación tecnológica detallada entre ellas.

El objetivo principal de este proyecto es proporcionar un material a los estudiantes, docentes, y público en general el cual permita estudiar las tecnologías LTE y LTE – A, mismas que han sido implementadas en nuestro país a fin de suplir las necesidades que actualmente son exigidas por la población ecuatoriana. El estudio técnico contemplará una descripción de las tecnologías 4G, estudio de la tecnología Long Term Evolution – LTE y Long Term Evolution Advanced – LTE Advanced analizando sus respectivas arquitecturas, pilas de protocolos, canales de protocolos, estructura de las tramas, señales físicas, métodos de acceso entre otros.

El estudio de estas tecnologías es relevante dado que según la Superintendencia de Telecomunicaciones - SUPERTEL¹ aclaró que en el país ninguna operadora posee la red 4G en dicha fecha. [1].

Este análisis se corrobora de acuerdo al comunicado de prensa de la Unión Internacional de Telecomunicaciones - UIT², cuyo contenido menciona que: *“el Sector de Radiocomunicaciones de la UIT (UIT-R) ha completado la evaluación de seis opciones de la tecnología mundial de banda ancha inalámbrica móvil 4G, también conocida como IMT-Avanzadas. La armonización de estas propuestas ha dado lugar a dos tecnologías, "LTE-Avanzadas1" y "MANInalámbrica-Avanzadas2", designadas oficialmente con la denominación IMT-Avanzadas y calificadas como verdaderas tecnologías 4G.”* [2],

Por lo expuesto, la SUPERTEL¹ estableció que la tecnología HSPA+³ implementada por las operadoras en nuestro país o LTE como tal, no se ajusta

¹ SUPERTEL: Superintendencia de Telecomunicaciones, organismo de control técnico en Ecuador.

² UIT: Unión Internacional de Telecomunicaciones

³ HSPA+: Evolved High Speed Packet Access

a los requerimientos de la UIT² para ser consideradas como tecnologías de cuarta generación (4G). [3].

El Capítulo uno de este proyecto, describe concisamente en la evolución de las tecnologías móviles contemplando temas relevantes técnicamente como: aplicaciones, servicios, equipos terminales entre otros.

En el Capítulo dos se centra en el estudio técnico de la tecnología 4G Long Term Evolution – LTE; se analiza la arquitectura, las redes de: acceso evolucionada, troncal de paquetes evolucionada y equipos de usuario. El estudio de este capítulo también aborda el estudio de: OFDM, OFDMA y SC-FDMA.

El capítulo tres se centra en el estudio de la tecnología 4G Long Term Evolution Advanced; se analiza la arquitectura, bandas de frecuencia y características relevantes propias de esta tecnología que son sólidamente sustentadas como una mejora a la tecnología 4g Long Term Evolution – LTE.

El capítulo cuatro se enfoca en la comparación técnica entre las tecnologías planteadas en este proyecto, enfocándose principalmente en los siguientes ítems: tecnológica, arquitectura de red, esquemas de modulación, técnicas de múltiples usuarios, equipos de usuario, servicios y aplicaciones entre otros. Finalmente, en el capítulo quinto se efectúan las conclusiones y recomendaciones del proyecto realizado.

JUSTIFICACIÓN

El avance tecnológico crece a pasos acelerados y no es una excepción la telefonía celular conjuntamente con las tecnologías involucradas. Este fenómeno se debe a que hoy en día no basta con los beneficios que ofrece la tecnología 3G, las limitaciones en lo que refiere a la velocidad, ancho de banda entre otros obliga a las empresas telefónicas a implementar otro tipo de soluciones que satisfagan la demanda de los usuarios.

Con la necesidad de satisfacer las necesidades y nuevas funcionalidades que exigen y demandan los usuarios, las compañías de telefonía celular plantean solventar las mismas a través de la implementación de las tecnologías 4G, adicionalmente de ofrecer otros beneficios tales como: videoconferencia e internet con velocidades que notablemente igual o superan al de una red de área local, enviar desde señales de televisión hasta controlar la energía del hogar mediante enchufes de pared, permitir la comunicación entre equipos informáticos y dispositivos que forman parte de nuestra vida cotidiana. Adicionalmente la implementación de estas tecnologías tiene como objetivo mitigar el problema de la saturación del espectro radioeléctrico.

Es por ello que, el presente trabajo se enfoca en realizar una descripción general de las tecnologías 4G para posteriormente realizar un estudio y análisis técnico comparativo entre las tecnologías LTE y LTE - A. El estudio técnico tendrá como alcance el análisis de la arquitectura, pilas de protocolos, canales de protocolos, estructura de las tramas, señales físicas, métodos de acceso entre otros.

Cabe enfatizar que LTE ha sido implementado y se encuentra funcionando en nuestro país desde diciembre del año 2013 en las ciudades de Quito y Guayaquil; [4] es por ello la importancia de este proyecto en realizar un estudio comparativo entre las tecnologías 4G planteadas; y de esta manera nos permita entender el conjunto de procesos y procedimientos tecnológicos que implica el implementar esta tecnología.

Además, se tiene como meta la utilización de este material como fuente de material bibliográfico para estudiantes, profesores y público en general de tal manera que les permita analizar las tecnologías que sean las más adecuadas,

eficientes y óptimas para la implementación en nuestro país y solventar las necesidades que hoy en día exigen los usuarios.

ANTECEDENTES

Las tecnologías celulares en las últimas décadas han evolucionado a pasos acelerados, esto radica fundamentalmente en las distintas necesidades presentadas por los usuarios que dieron lugar a generaciones tecnológicas, mismas que se procede a describirlas a continuación:

(1G) Primera Generación: Su aparición fue en el año 1979. Se caracteriza fundamentalmente por realizar transmisiones de tipo analógico prestando el servicio únicamente por voz. [5].

Según datos de la SUPERTEL, en el país el servicio móvil celular comenzó a finales de 1993 con la entrada en el mercado de Porta, hoy Claro. Luego ingresó Celular Power, que cambió su nombre a Bellsouth y ahora es Movistar. En el 2003 entró al mercado Alegro, hoy CNT móvil. [4]

(2G) Segunda Generación: Se caracteriza fundamentalmente por ofrecer los servicios de voz y de datos digitales de volúmenes bajos. Por ejemplo: mensajería de texto - SMS; multimedia, identificador de llamadas entre otros. [5]

(3G) Tercera Generación: Se caracteriza fundamentalmente por ofrecer mayor capacidad significativamente que las 2G, además de ofrecer servicios más sofisticados. Por ejemplo: Servicio de Mensajes Multimedia (MMS) hasta comunicaciones M2M. [6]

La tecnología que se ha utilizado entre 1993 y 2013 pasó por cuatro generaciones.

En el primer semestre del 2011 la tecnología HSPA+ fue lanzada y siendo esta promocionada por ciertas operadoras en nuestro país como tecnología 4G ofreciendo velocidades de hasta 10 megabytes por segundo de descarga, y 2 megabytes para subir archivos.; dicha tecnología no forma parte de la tecnología 4G según informe realizado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones,

organismo encargado de dictar las normas y reglamentos a los cuales está sujeto el Ecuador, como país miembro. [1] Es así que, la SUPERTEL tomó las medidas correctivas correspondientes en aquel entonces, para que las operadoras de telefonía móvil no publiciten la implementación de redes móviles de cuarta generación (4G), hasta que el servicio ofertado cumpla con las especificaciones emitidas por la UIT.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Realizar un estudio técnico comparativo entre las tecnologías Long Term Evolution – LTE y Long Term Evolution Advanced, de tal manera que nos permita analizar y entender la arquitectura, tecnología, recursos y servicios con los que se caracterizan para su eficiente implementación y funcionamiento.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar la evolución de las tecnologías de telefonía móvil, y poder distinguir el alcance y limitaciones tecnológicas de cada una de las generaciones.
- Estudiar y analizar la arquitectura, gestión de sesiones, tecnologías, recursos y servicios de las tecnologías LTE y LTE - Advanced.
- Comparar la tecnología, bandas de frecuencia, arquitectura de red, equipos de usuario entre otros; con las cuales operan las tecnologías LTE y LTE - Advanced.

CAPÍTULO 1

CUARTA GENERACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE TELEFONÍA MOVIL

1.1. INTRODUCCIÓN

El avance tecnológico crece a pasos acelerados, y no es una excepción la telefonía móvil y sus tecnologías como se lo evidencia a través de la evolución de las generaciones: 1G, 2G, 2.5G, 3G y 4G.

Esta evolución se debe, ya que inicialmente el teléfono móvil era utilizado para realizar únicamente llamadas, pero al transcurrir el tiempo se fue ofertando otros tipos de servicios desde servicios de mensajes cortos –SMS hasta la domótica que hoy en día han sido implementados en aquellos países desarrollados.

Sin embargo, para poder ofrecer esta variedad de servicios la telefonía móvil se ve en la necesidad de implementar la tecnología 4G, que sin lugar a duda ha evolucionado y facilitado la comodidad del ser humano. Esto se evidencia gracias a la velocidad del Internet impresionante que permite a los usuarios bajar archivos en tiempos relativamente cortos. Para tener un panorama más claro a través de la tecnología 4G se pueden citar los siguientes ejemplos:

- Descargar una fotografía en un segundo, una película DVD de 2 horas de duración en 4,8 minutos, y una película HD de una hora de duración en 17 minutos; tiempo que, comúnmente tomaba con la tecnología 3G 2 y 8 horas respectivamente.
- Permitir hacer videoconferencias y llamadas de voz por VoIP.
- Ver televisión o escuchar radio mediante el Internet sin intermitencia y sin importar el lugar donde se encuentre el usuario.

En Latinoamérica, existen varios países que han implementado la tecnología 4G, por ejemplo: México, República Dominicana, Colombia, Brasil, Bolivia, Chile, Paraguay y Uruguay. En Ecuador inició la implementación de LTE en el mes de

diciembre de 2013, específicamente en las ciudades de Quito y Guayaquil; y en la actualidad a nivel nacional; surge entonces, la importancia de realizar un análisis y estudio técnico de esta tecnología, así como también de LTE-Advanced como posible tecnología que puede ser implementada en un futuro.

1.2. EVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA MÓVIL [5] – [10]

1.2.1. PRIMERA GENERACIÓN “1G”

Esta generación surge entre las décadas de 1970 y 1980, caracterizándose fundamentalmente por ser analógica y específicamente para voz. Las tecnologías predominantes en esta generación fueron: el Sistema Avanzado de Telefonía Móvil, Advanced Mobile Phone System – AMPS (por sus siglas en inglés) usado esencialmente en Estados Unidos, mientras que la Telefonía Móvil Nórdica, Nordic Mobile Telephone – NMT (por sus siglas en inglés) usado esencialmente como su nombre lo indica en los países Nórdicos, Rusia entre otros.

La transmisión inexacta e imprecisa entre las celdas mientras el usuario se movilizaba, poseer una baja calidad de sonido y no contar con seguridades eran las principales debilidades de esta primitiva telefonía celular.

No obstante fue la tecnología que revolucionó en aquella época, utilizando teléfonos móviles nombrados como “teléfonos ladrillo” o “teléfonos bolsa”; esto debido su tamaño y peso; como se lo puede apreciar en la Figura 1Figura 1.



Figura 1: Teléfono Celular de la Primera Generación [7]

1.2.2. SEGUNDA GENERACIÓN “2G”

Esta generación surge entre las décadas de 1980 y 1990, caracterizándose fundamentalmente por ser digital en lugar de ser analógica como lo fue en la primera generación. Las tecnologías predominantes en esta generación fueron: Sistema Global de Comunicaciones Móviles, Global System for Mobile Communications – GSM (por sus siglas en inglés), Acceso Múltiple por División de Tiempo, Time Division Multiple Access – TDMA (por sus siglas en inglés), Acceso Múltiple por División de Código, Code Division Multiple Access – CDMA (por sus siglas en inglés).

La seguridad, calidad de voz, roaming y la velocidad de información que alcanzó hasta los 9.6 kbps; fueron las principales particularidades de esta generación; además de ofrecer nuevos servicios tales como: servicio de mensajes escritos, short message service – SMS (por sus siglas en inglés), identificador de llamadas y conferencia tripartita entre otros.

La digitalización en esta generación conllevó considerablemente a reducir: tamaño, costo y consumo de energía en los dispositivos móviles, como se lo puede apreciar en la Figura 2.



Figura 2: Teléfono Celular de la Segunda Generación [7]

1.2.3. SEGUNDA GENERACIÓN Y MEDIA “2.5G”

Esta generación se caracteriza fundamentalmente por proporcionar velocidades superiores a 14.4 Kbps superando la velocidad que ofrece la generación 2G. Las tecnologías predominantes en esta generación fueron: Circuitos Conmutados de Datos de Alta Velocidad, High Speed Circuit Switched Data – HSCSD (por sus

siglas en inglés), Servicio General de Paquetes por Radio, General Packet Radio Services – GPRS (por sus siglas en inglés) y Velocidades Mejoradas de Datos para la Evolución de GSM, Enhanced Data Rates for GSM Evolution – EDGE (por sus siglas en inglés).

Los servicios que ofrece esta generación son: Juegos en línea, Push To Talk – PTT (consiste en que el teléfono móvil se convierte en un walkie-talkie), Servicio de Mensaje Multimedia- MMS entre otros. En la Figura 3 se puede apreciar un teléfono móvil que corresponde a esta generación:



Figura 3: Teléfono Celular de la Segunda Generación y Media [7]

1.2.4. TERCERA GENERACIÓN “3G”

Esta generación surge con el objetivo fundamental de aumentar la capacidad de los sistemas en las redes móviles y solventar la saturación del espectro percances que presentaban las tecnologías predecesoras; esto, debido a que la sobredemanda de los usuarios congestionaba la red y no permitía establecer comunicación. Las tecnologías predominantes en esta generación son: Sistema universal de telecomunicaciones móviles, Universal Mobile Telecommunications System – UMTS (por sus siglas en inglés) y Acceso Múltiple por División de Código 2000, Code Division Multiple Access 2000 de tercera generación – CDMA2000 (por sus siglas en inglés).

Los servicios que ofrece esta generación son: altas velocidades de información llegando hasta 2.4 Mbps, videoconferencia, acceso rápido a Internet entre otros. En la Figura 4 se puede apreciar un teléfono móvil que corresponde a esta generación:



Figura 4: Teléfono Celular de Tercera Generación [7]

1.2.5. CUARTA GENERACIÓN “4G”

Esta generación se caracteriza fundamentalmente por estar basada en IP; ofrece velocidades de transmisión desde 100 Mbps en movimiento hasta 1 Gbps en reposo. Las tecnologías calificadas como verdaderas en esta generación según el sector de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones – UIT-R son: LTE-Avanzadas y MAN Inalámbricas-Avanzadas. En la Figura 5 se puede apreciar un teléfono móvil que corresponde a esta generación:



Figura 5: Teléfono Celular de Cuarta Generación [7]

1.3. TECNOLOGÍAS DE LA TELEFONÍA MÓVIL ^[11] – ^[12]

Las tecnologías móviles han ido evolucionando desde la aparición de AMPS, tecnología utilizada en la primera generación hasta la cuarta generación como LTE Avanzadas.

En la Figura 6 se puede apreciar la evolución de las tecnologías de la telefonía móvil:

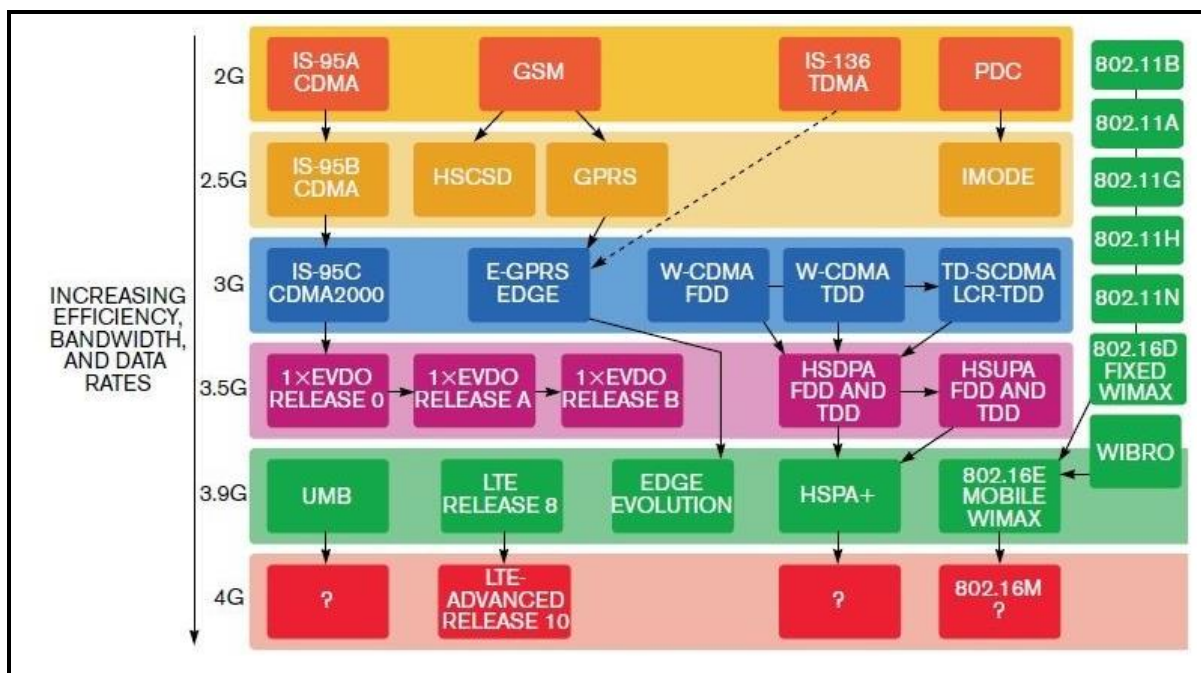


Figura 6: Evolución de las Tecnologías móviles [11]

A continuación, se procederá brevemente a describir algunas de las tecnologías predominantes desde la primera generación hasta la tercera generación; para posteriormente en los capítulos subsiguientes estudiar a profundidad la tecnología LTE Avanzadas perteneciente a la cuarta generación.

1.3.1. SISTEMA AVANZADO DE TELEFONÍA MÓVIL – AMPS

El sistema avanzado de telefonía móvil – AMPS, fue la tecnología utilizada en la primera generación. En esta generación se introdujo el concepto de Handoff o transferencia conocido también como Handover o traspaso; sistema cuyo objetivo principal es de transferir la comunicación o servicio de una estación radio base a otra cuando la calidad de la comunicación es insuficiente en una de las estaciones.

La arquitectura de esta tecnología está dividida en tres partes como se puede apreciar en la Figura 7:

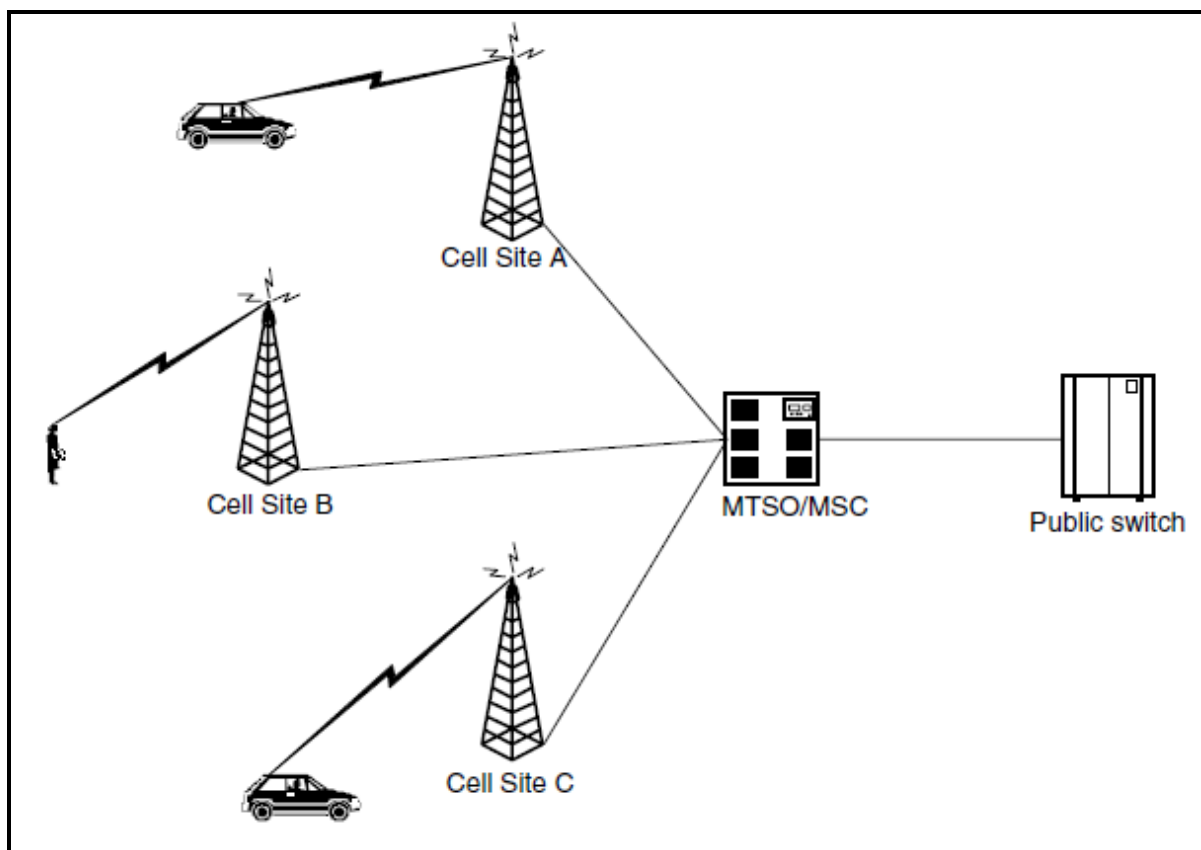


Figura 7: Sistema Avanzado De Telefonía Móvil – AMPS [12]

- Primera Parte: Constituida por estaciones móviles, terminales utilizados por los usuarios suscriptores para generar tráfico y mantendrán comunicación con la estación base.
- Segunda Parte: Constituida por estaciones de radio base, equipamiento encargado de receptor la información del usuario y establecer un formato de tramas E1 o T1 y enviar a la Central de Conmutación y Control (MTSO / MSC) sea por medio inalámbrico o físico. Este proceso es inverso al mantener la comunicación entre el MTSO/MSC y el usuario.
- Tercera Parte: Constituida por la Central de Conmutación y Control (MTSO / MSC); que, además de interconectar entre un conjunto de celdas, tiene como funcionamiento ejecutar el procesamiento de las comunicaciones y de servir como gestor de todas las comunicaciones. Es así, que el MTSO debe registrar la siguiente información en una base de datos:

- Llamadas realizadas por los usuarios suscriptores.
- Verificar y actualizar el estado de la llamada.
- Ejecutar la interconexión de las comunicaciones de los usuarios suscriptores a la PSTN o su propia red.

1.3.2. SISTEMA GLOBAL DE COMUNICACIONES MÓVILES – GSM

Este sistema fue la tecnología utilizada en la segunda generación. La arquitectura de esta tecnología está dividida en seis partes fundamentales, como se puede apreciar en la Figura 8:

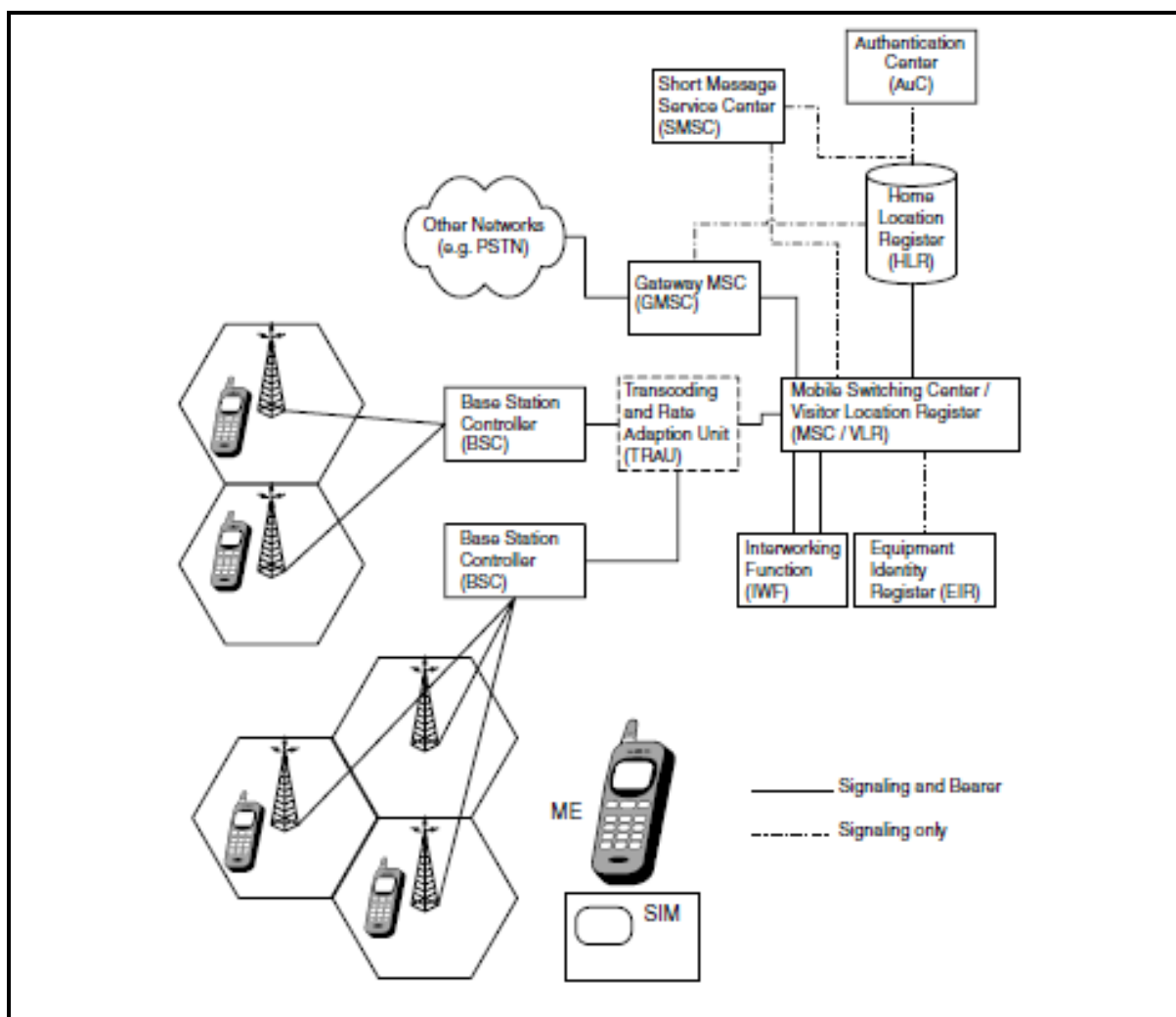


Figura 8: Sistema Global de Comunicaciones Móviles - GSM [12]

- Primera Parte: Constituida por estaciones móviles, terminales utilizados por los usuarios suscriptores para generar tráfico y mantendrán comunicación con la estación base.
 - La estación móvil está conformada por dos partes en sí: Por el equipo del móvil y una tarjeta *Subscriber Identity Module* (SIM por sus siglas en inglés). Esta tarjeta contiene básicamente información relevante como: información específica del usuario, identificación en la red, entre otros.
- Segunda Parte: Constituida por la estación base, Base Station – BS (por su sigla en inglés), encargada de mantener comunicación con el sistema central y el enlace con el resto de red.
- Tercera Parte: Constituida por el controlador de estación base, Base Station Controller – BSC (por su sigla en inglés), encargada del reparto de frecuencias y el control de potencia tanto de la estación móvil como de la estación base.
- Cuarta Parte: Constituida por el subsistema de red y conmutación, Network and Switching System – NSS (por su sigla en inglés), encargada del enrutamiento de la llamada y almacenamiento de datos.
- Quinta parte: Constituida por la central de conmutación móvil, mobil switching central – MSC, encargada de iniciar, terminar y canalizar las llamadas a través del BSC y BS.
- Sexta parte: Constituida por registros de ubicación base y visitante, home location register- HLR (por su sigla en inglés) y visitor location register – VLR (por su sigla en inglés), son:

HLR: Bases de datos que almacenan la posición de la estación móvil, servicios a los que puede acceder o no, entre otros).

VLR: Base de datos que almacena permisos, tipos de abono, localizaciones en la red de los usuarios activos en el área cubierta por un MSC; encargada de comunicarse con el HLR de origen del usuario a fin de obtener información relevante del mismo y evitar fraudes, toda vez que el usuario puede contar con permisos de servicios o no.

1.3.3. ACCESO MÚLTIPLE POR DIVISIÓN DE CÓDIGO – CDMA

El acceso múltiple por división de código CDMA, fue la tecnología también utilizada en la segunda generación. La arquitectura tiene básicamente como los sistemas celulares, es decir está constituida por: estación móvil, estación base, controlador de estación base, subsistema de conmutación y control; y, registros de ubicación base y visitante. La arquitectura del CDMA se puede apreciar en la Figura 9:

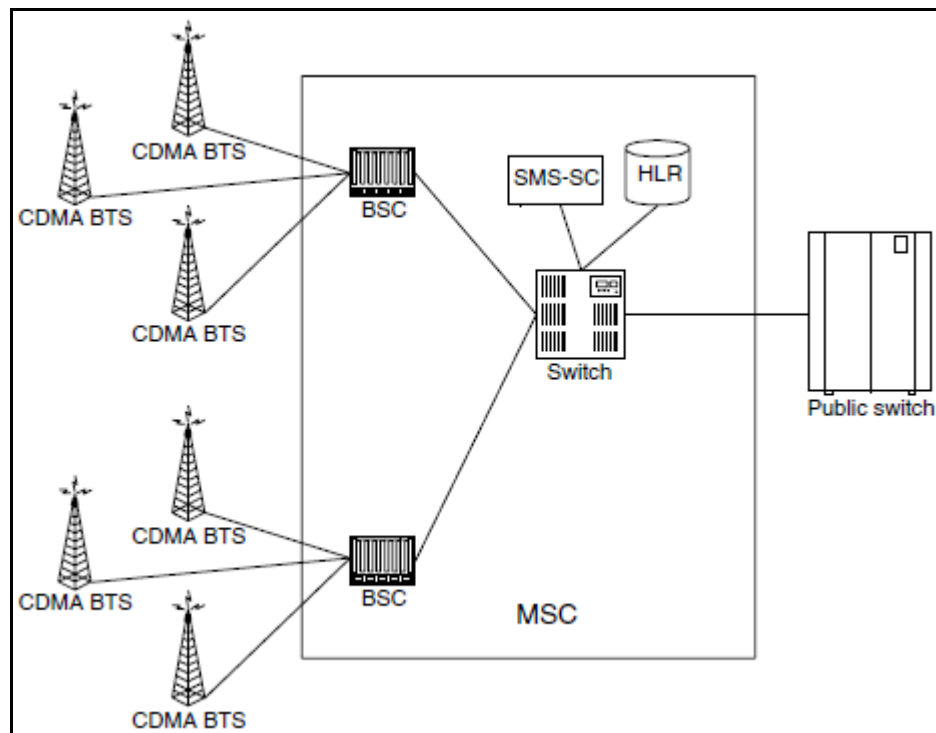


Figura 9: Acceso Múltiple por División de Código- CDMA [12]

1.3.4. SERVICIO GENERAL DE PAQUETES POR RADIO – GPRS

El servicio general de paquete por radio – GPRS, fue la tecnología utilizada en la segunda generación y media. La arquitectura de esta tecnología está incorporada a la arquitectura GSM, agregando básicamente dos nodos: GGSN y SGSN, como se puede apreciar en la Figura 10:

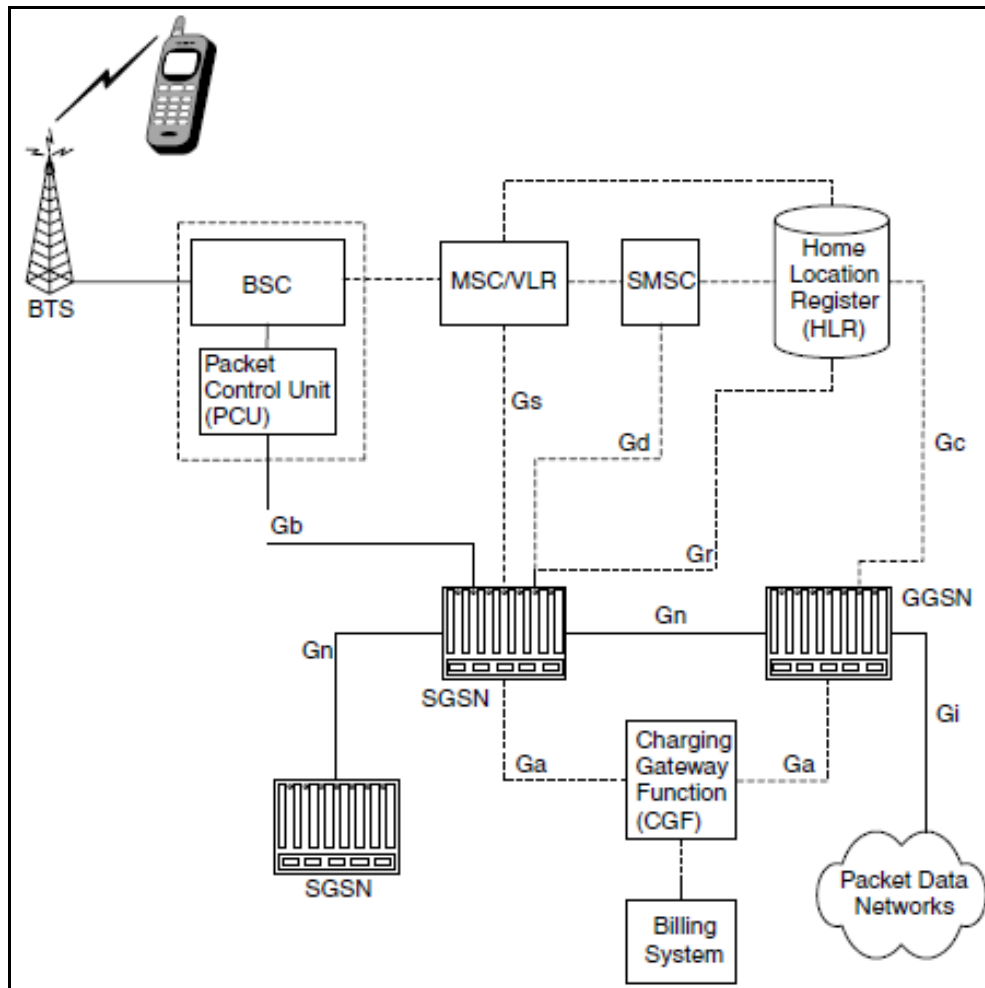


Figura 10: Servicio General de Paquete por Radio – GPRS [12]

GGSN - Gateway GPRS Support Node: Encargado del enrutamiento tanto de los datos que origina las estaciones móviles hacia la red correspondiente, como los datos que provienen desde las redes externas hacia las subredes correspondientes. Así mismo, si al recibir datos de un usuario cuya dirección está activa, los mismos son enviados al nodo SGSN.

SGSN - Serving GPRS Support Node: Encargado del transporte de los paquetes de datos desde y hacia el BTS que se encuentran en su área de servicio. También permite detectar las nuevas estaciones móviles GPRS en dicha área guardando registros de su localización.

1.3.5. SISTEMA UNIVERSAL DE TELECOMUNICACIONES MÓVILES – UMTS

El sistema universal de telecomunicaciones móviles – UMTS, fue la tecnología utilizada en la tercera generación. La arquitectura de esta tecnología está dividida en dos dominios fundamentales, conectándose a través de la interfaz de radio Uu, como se puede apreciar en la Figura 11:

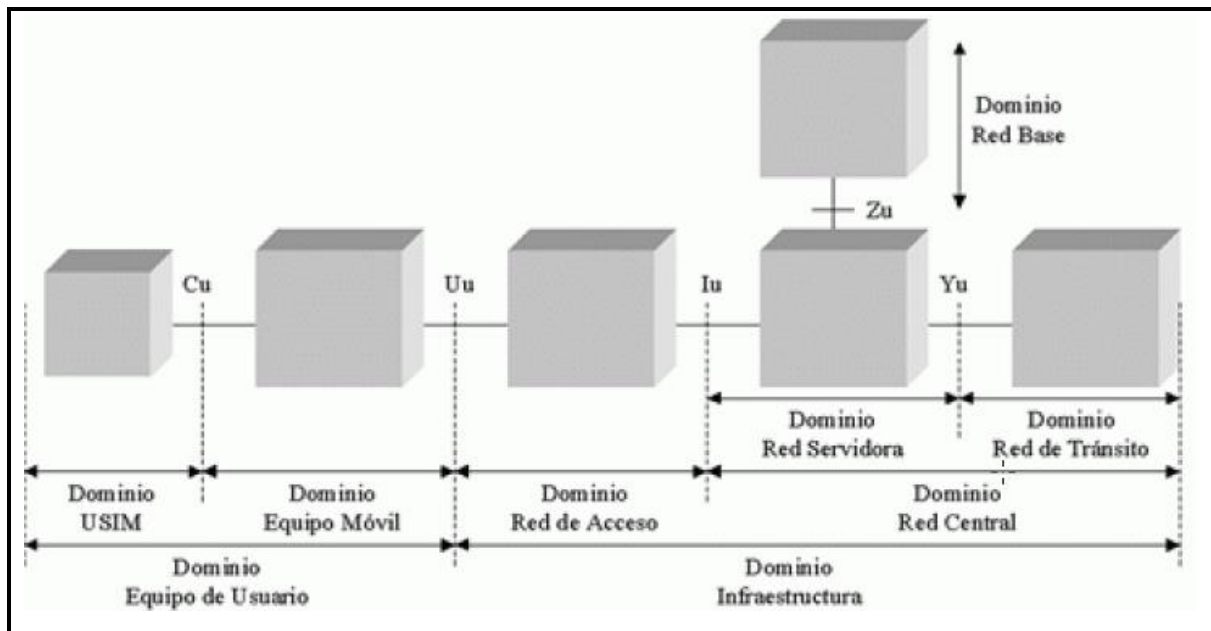


Figura 11: Sistema universal de telecomunicaciones móviles – UMTS [12]

- Dominio del equipo de usuario: Constituido por los dominios: equipo móvil y USIM.
 - Dominio equipo móvil: Encargado de la transmisión por radio.
 - Dominio USIM: Encargado de identificar al usuario, independizándolo del equipo móvil.
- Dominio de infraestructura: Constituido por los dominios de red de: acceso y de red central.
 - Dominio de red de acceso: Definida como red de acceso de radio terrestre UMTS- UTRAN. Encargada de la conexión entre terminales y el núcleo de red.

- Dominio de red central: Encargada de almacenar la información de los usuarios tanto de la red propia como visitante. Así mismo, permite al usuario el acceso a los servicios ofrecidos por la red.

1.3.6. ACCESO MÚLTIPLE POR DIVISIÓN DE CÓDIGO 2000 – CDMA 2000

El acceso múltiple por división de código 2000 – CDMA 2000, fue la tecnología utilizada en la tercera generación. La arquitectura de esta tecnología está dividida en tres dominios fundamentales siendo estos: dispositivo de usuario, red de acceso por radio y red de datos en paquetes, como se puede apreciar en la Figura 12:

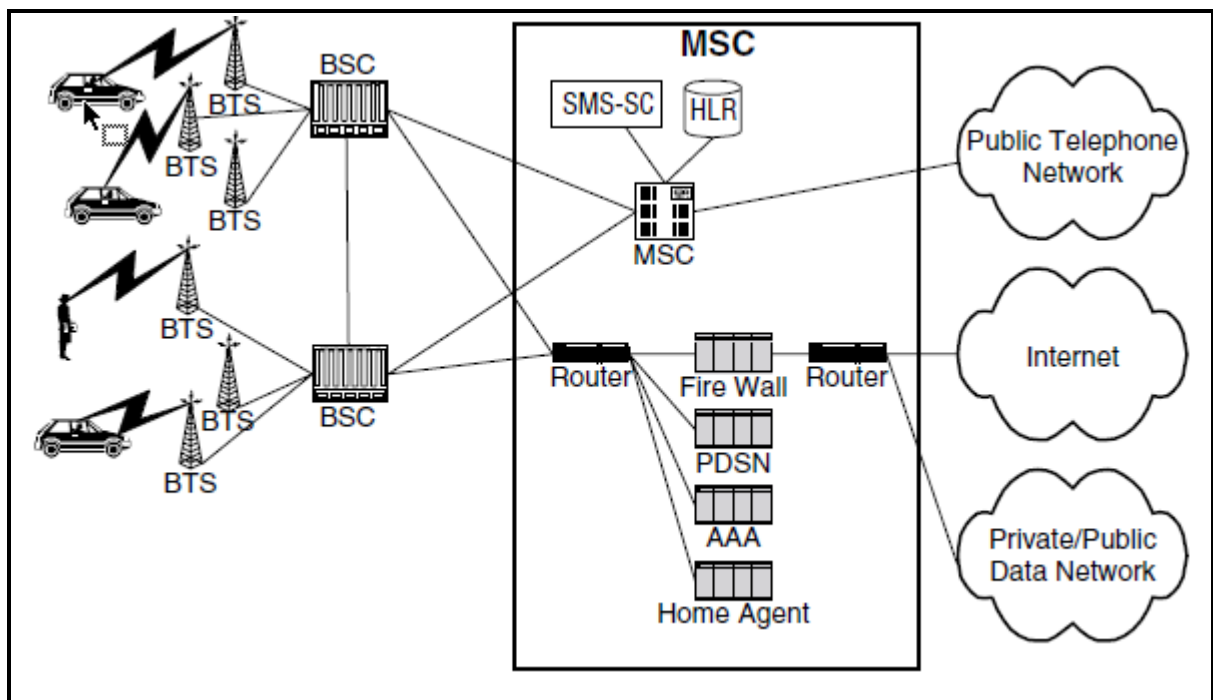


Figura 12: acceso múltiple por división de código 2000 – CDMA 2000 [12]

- Dispositivo de Usuario: Constituida por estaciones móviles, terminales utilizados por los usuarios suscriptores para generar tráfico.
- Red de acceso por radio (AN): Constituida por varias estaciones base – BTS, mismas que son implementadas a través de los Controladores de estación base – BSC a fin de que éstos sean los encargados de asignar recursos de radio y conectividad entre AN.

- Red de datos en paquetes: Constituida por el Nodo de Servicios de Datos en Paquetes – PDSN, el servidor para Autenticación, Autorización y Contabilidad. El PDSN es el encargado de administrar las direcciones IP, enrutamiento de paquetes y soporte de autenticación para servicio de datos en paquetes. El AAA es un servidor de base de datos encargado de almacenar información relevante del usuario; así mismo, permite la autenticación, autorización y contabilidad para servicio de datos.

1.4. CONCLUSIÓN

Se ha analizado la evolución de las tecnologías móviles, determinando y analizando el alcance y limitaciones tecnológicas de cada una de las generaciones. Para el caso particular de las tecnologías analizadas en el presente proyecto, se menciona que LTE y LTE – Advanced fue creado por el 3GPP, organismo que creó también GSM y UMTS.

CAPÍTULO 2

LONG TERM EVOLUTION – LTE

2.1. INTRODUCCIÓN

LTE surge para cubrir las necesidades de los usuarios estableciendo conexiones de datos a velocidades superiores de tecnologías predecesoras, más segura y con alta disponibilidad; todo esto en virtud que hoy en día se utiliza más el internet para descargar aplicaciones, visualización de contenidos multimedia, videoconferencia, televisión, juegos online entre muchas actividades más. Para alcanzar todas estas bondades, esta tecnología ha implementado técnicas en hardware y software; mismas que se hace una síntesis del contenido que tratará en el siguiente capítulo.

Primero se iniciará con el análisis de la arquitectura del sistema, el cual involucra el análisis de las arquitecturas de: 3GPP, E-UTRAN entre otros.

Segundo se estudiará la gestión de sesiones, movilidad y seguridad en LTE. En la gestión de sesiones involucra los servicios de conectividad IP y portador EPS, modelo de QoS, sistema PCC. En la gestión de movilidad involucra la localización, handover y procedimientos, mientras que en la gestión de seguridad abarca la seguridad a: acceso a la red e infraestructura; y, procedimientos de gestión de seguridad.

Tercero se estudiará las tecnologías de nivel física, involucra específicamente la modulación y demodulación de OFDM, sistemas celulares, las estructuras con varias antenas (MIMO) y las estructuras de transmisión y recepción de OFDM.

Cuarto se estudiará la interfaz de radio del sistema LTE, involucra la división funcional y pilas de protocolos, RRC, PDCP, capa física, mapeo entre canales físicos, transporte y lógicos.

Finalmente, se estudiará la gestión de recursos de radio y del espectro radioeléctrico.

2.2. ARQUITECTURA DEL SISTEMA LTE [13] – [18], [21]

Antes de profundizar en el análisis de la arquitectura del sistema LTE, se debe señalar que la arquitectura de los sistemas 3GPP (3rd Generation Partnership Project) que contempla a GSM, UMTS y LTE están constituidas por 3 partes fundamentales, como se puede apreciar en la Figura 13:

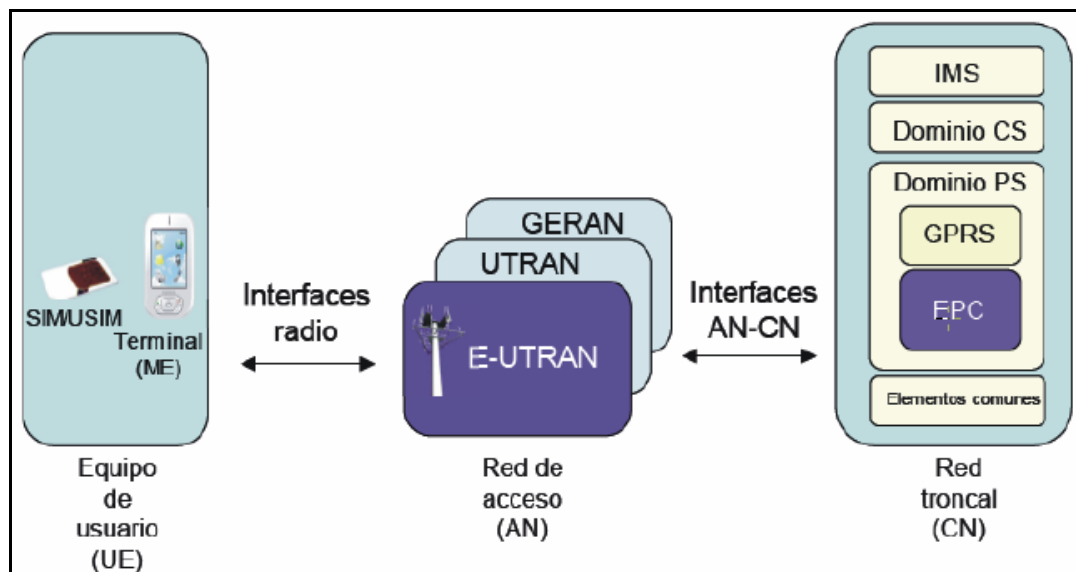


Figura 13: Arquitectura General de los sistemas 3GPP [13]

Parte 1: Constituida por el equipo de usuario, formada por el equipo móvil y la SIM.

Parte 2: Constituida por la Red de Acceso (AN), siendo éstas GERAN, UTRAN Y E-UTRAN. Cada red de acceso cuenta con sus propias interfaces de radio, es así que su correspondencia entre la red de acceso y las interfaces radio son las siguientes:

RED DE ACCESO (AN)	INTERFAZ DE RADIO
GERAN	TDMA
UTRAN	WCDMA
E-UTRAN	OFDMA

Parte 3: Constituida por la Red Troncal (CN), misma que se divide en: dominio de circuitos (Circuit Switched Domain – CS), dominio de paquetes (Packet Switched Domain – PS), el subsistema IP Multimedia (IP Multimedia Subsystem, IMS) y elementos comunes. Así mismo, para establecer comunicación entre las redes de acceso y la troncal es necesario contar con interfaces de CN y AR.

Dentro de las funciones que cumplen cada dominio de la Red de Troncal, se puede describir las siguientes:

- IMS: Se encarga de proporcionar servicios que trabajan bajo IP, utilizando el mecanismo de transporte los servicios de conectividad de PS.
- CS: Se encarga de proporcionar servicios de telecomunicaciones que trabajan bajo conmutación de circuitos, tales como: voz y videoconferencia.
- PS: Se encarga de proporcionar servicios de telecomunicaciones que se basan en conmutación de paquetes. Está constituido por GPRS y EPC (Evolved Packet Core por sus siglas en inglés).
- Elementos comunes: Constituido por Hardware y Software que permiten operar de forma eficiente entre el resto de componentes: CS, PS, IMS.

La arquitectura de LTE está constituida fundamentalmente por: E-UTRAN, EPC y la evolución de IMS. Ambas redes brindan servicios cuya transferencia de información se basa en IP. Una de las grandes bondades de este sistema es que permite la interconexión entre redes de acceso 3GPP y las que no son, para lograr este objetivo utilizan varias interfaces de la EPC, como se puede apreciar en la Figura 14:

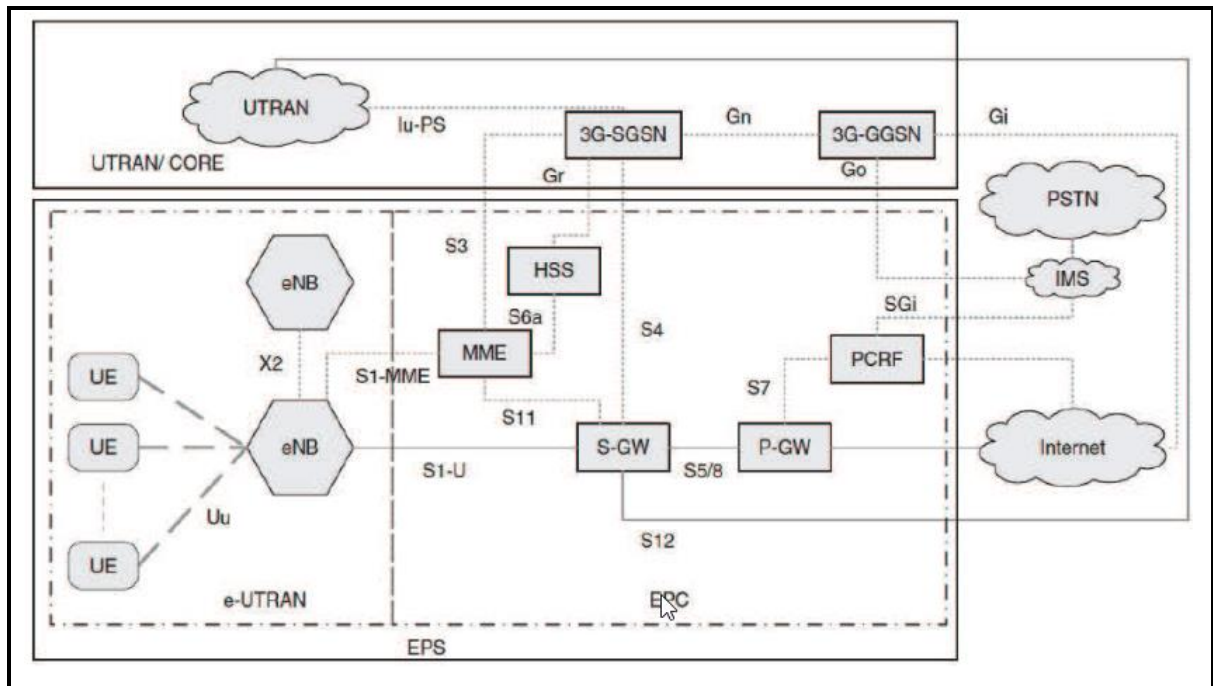


Figura 14: Arquitectura de LTE [13]

Algunos de los componentes de la arquitectura de este sistema se describen a continuación:

- Uu: interfaz entre el equipo usuario y E-UTRAN, conocida también como interfaz de radio LTE.
- S1: interfaz entre E-UTRAN y EPC
- SGi: interfaz de EPC a fin de establecer conexión hacia redes externas y plataformas de servicios.
- EPC: Está constituido por HSS (Home Subscriber Server), mismo que contiene la base de datos con información relevante de los usuarios.

2.2.1. ARQUITECTURA DE E-UTRAN

Uno de los componentes de la arquitectura del sistema LTE como se dijo anteriormente es E-UTRAN, red de acceso. E-UTRAN se constituye por varios elementos como se puede observar en la Figura 15:

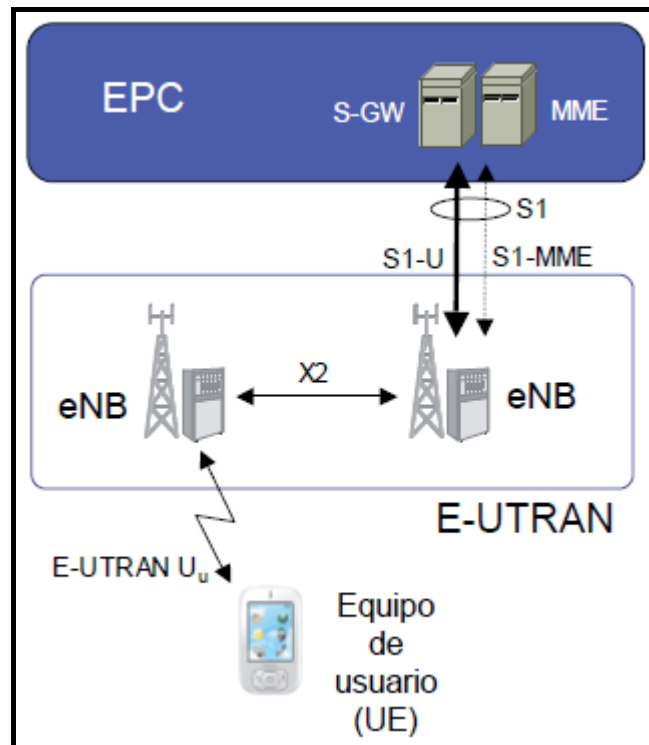


Figura 15: Elementos de E-UTRAN [13]

- eNBs (Envolved Node B): Encargada de la conectividad entre el equipo de usuario y la EPC. Éste a su vez se conecta con el resto de elementos del sistema a través de las siguientes interfaces: E-UTRAN Uu, S1 y X2. Una de las funciones que destaca de la interfaz Uu es la transferencia de información por el canal radio entre el eNB y el equipo de usuario.
- S1: Interfaz encargada de la conectividad entre eNB y EPC. Está constituido por: interfaz S1-U y la interfaz S1- MME.
 - S1-MME: Encargada de la conectividad entre eNB y la entidad de red perteneciente a EPC conocida como Mobility Management Entity.
 - S1-U: Encargada de la conectividad entre eNB y SGW (Serving Gateway), entidad de red que pertenece a EPC.

- X2: Encargada de la conectividad entre sí de los eNBs. Debido a esta funcionalidad, los eNBs envían información de señalización a fin de disminuir las interferencias que se puedan producir, permitiendo mejorar los recursos de radio. Así mismo, en un proceso de handover se puede transportar tráfico de los usuarios a través de ésta interfaz.

En los siguientes subtemas se procederá a analizar minuciosamente las entidades de red e interfaces de E-UTRAN:

2.2.1.1. Entidades de red e interfaces

2.2.1.1.1. *Envolved Node B*

Equivalente a una estación base tradicional, se encarga de integrar las funciones de E-UTRAN. El conjunto de protocolos de capa de acceso entre el equipo de usuario y el involved node B (eNB) se denominan Access Stratum. Dichos protocolos permiten al eNB transmitir paquetes IP hacia el UE y viceversa. Al servicio que transmite paquetes IP entre el eNB y el UE se le conoce como servicio portador de radio – Radio Bearer (RB).

Entre las funciones principales del eNB destacan las siguientes:

- Gestión de los recursos radio tales como: control de admisión de los servicios portadores radio (RB), control de movilidad (handover), asignación dinámica conocidas como funciones scheduling, control de interferencia entre estaciones base, entre otros.
- Selección dinámica de la entidad MME de la red troncal EPC cuando un equipo de usuario se registra en la red. Esta funcionalidad es importante dado que un determinado MME controlará el acceso a un determinado usuario permitiendo balancear la carga entre el conjunto de MME, así como robustecer el sistema frente a posibles fallas que se puedan suscitar.

2.2.1.1.2. Interfaz Radio

Esta interfaz gestiona estrategias de transferencia de la información que se produce en el canal radio, siendo los siguientes: difusión de señalización, transferencia de paquetes IP de los usuarios a través del canal radio y transferencia de señalización de control dedicada entre eNB y el equipo de Usuario, como se puede observar en la Figura 16:

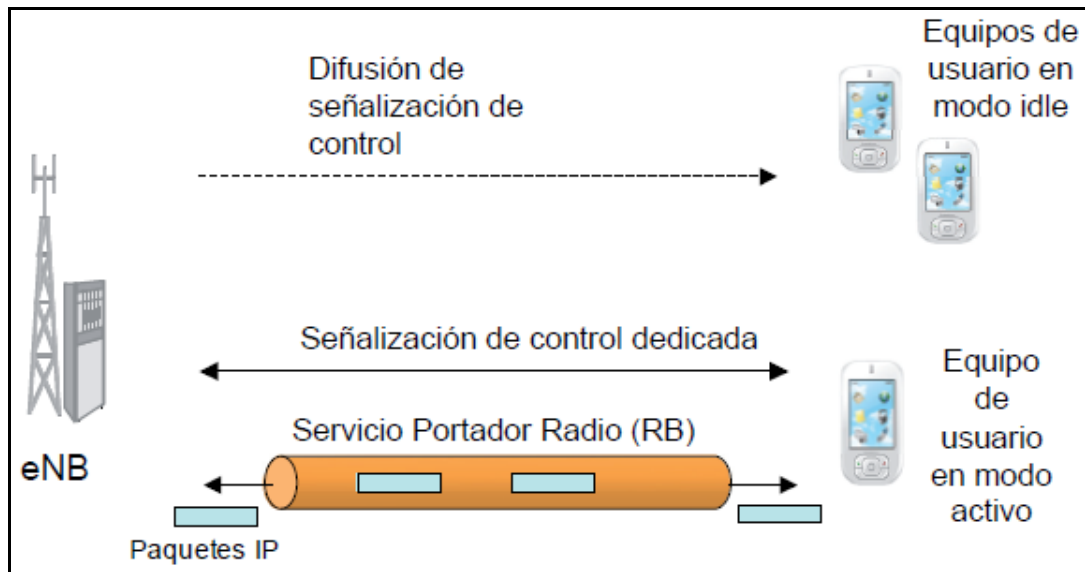


Figura 16: Mecanismos de transferencia de la información en la Interfaz de Radio [13]

Los mecanismos de transferencia de información son:

- Difusión de señalización de control: La información enviada hacia los equipos de usuario les permite descubrir los eNB, conociendo sus parámetros de operación al igual que la identidad de los operadores de red a los que puede acceder a través del eNB.
- Transferencia de paquetes IP de los usuarios a través del canal radio: A través de este mecanismo se permite establecer la transferencia de los servicios portadores de radio (RB). Cabe destacar que los servicios de E-UTRAN soportan tráfico IP específicamente. Una de las características fundamentales de los servicios portadores es la comprensión de cabeceras de los paquetes IP, reduciendo notablemente la cantidad de bytes a ser enviados a través de la interfaz de radio.

- Transferencia de señalización de control dedicada entre eNB y el equipo de Usuario – UE: Para aplicar este mecanismo es necesario utilizar el protocolo Radio Resource Control (RRC). A través de este es viable:
 - Establecer, actualizar y liberar los servicios portadores que se da entre el equipo de usuario y el eNB.
 - Controlar y enviar medidas de radio desde los terminales hacia el eNB.
 - Handover, permitiendo al equipo del usuario que cambie de celda manteniendo los servicios de portadores de radio establecidos.

Los equipos de usuario que mantienen conexión de control con E-UTRAN se encuentran en modo activo, por lo contrario, los que no lo están se encuentran en modo idle, equipos que se encuentran monitorizando únicamente la información difundida por la red.

2.2.1.1.3. Interfaz S1

La interfaz S1 se divide en los siguientes planos: de usuario (S1-U) y de control (S1-MME), como se puede apreciar en la Figura 15. La interfaz S1-U se caracteriza por entregar la información entre el eNB y S-GW sin contar con controles de: flujos y mecanismos de errores.

El conjunto entre el servicio portador de radio (RB) y el servicio portador S1 forman el servicio portador completo que ofrece la red de acceso E-UTRAN denominado como E-RAB (E-UTRAN Radio Access Bearer), como se expone en la Figura 17:

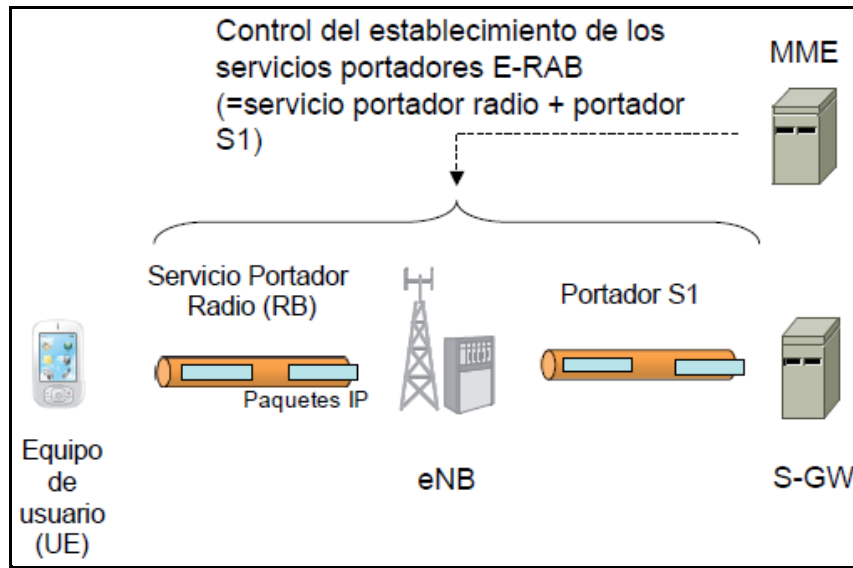


Figura 17: Servicio portador completo conformado por Servicio Portador Radio (RB) + Portador S1 [13]

El sistema LTE no permite que tanto un eNB como el equipo de usuario inicien por cuenta propia el servicio de portador de radio (RB), la entidad red MME es el único encargado de realizar este proceso.

Los procedimientos principales que ejecuta la interfaz S1 son:

- Procedimiento de: establecer, actualizar y liberar servicios portadores en las interfaces: radio y S1.
- Procedimiento de Handover entre los eNB: Si al determinar la red E-UTRAN que un equipo de usuario debe cambiar de eNB y no existiese la interfaz X2 entre los eNB, entonces actúa la interfaz S1-MME a fin de ejecutar el proceso de handover.
- Procedimiento de aviso (Paging): La entidad de red MME se caracteriza también por gestionar la localización de los equipos de usuario en la red. A través del conjunto de eNB llamados áreas de seguimientos (Tracking áreas), un equipo de usuario en estado idle puede ser localizado y cambiado a estado activo; para ello la interfaz S1-MME ejecuta el mecanismo de aviso al conjunto de eNB donde probablemente se encuentre el equipo de usuario.

- Los mensajes de señalización de control que se genera entre MME y el equipo de usuario son enviados de forma transparente entre MME y eNB. Estos mensajes pertenecen a los protocolos llamados NAS (Non Access Stratum).
- Aprobar la conexión simultánea entre un eNB contra varios equipos de red troncal; tales como: MME y/o S-GW). A esta funcionalidad se le conoce como S1-flex, obteniéndose las siguientes bondades:
 - En caso de presentarse un malfuncionamiento en la red troncal, el eNB continuaría ofreciendo el servicio, toda vez que éste mantendría conectado con otras entidades de red.
 - Al mantenerse conectado con varias entidades de red, un eNB puede facilitar el acceso a las diferentes operadoras de red que comparten el canal de acceso.

2.2.1.1.4. Interfaz X2

Esta interfaz cuenta también con los planos de: usuario y de control. El proceso de transferencia es similar al análisis realizado en la interfaz S1. Es decir, la transferencia de información en el plano de usuario se lo realiza sin ninguna garantía, tampoco cuenta con controles de: flujos y mecanismos de errores. Este mecanismo se lo aplica durante el proceso de handover. Por lo contrario, el plano de control realiza control de transparencia de paquetes IP a X2, es decir da soporte del mecanismo de handover entre eNB.

2.2.1.2. Protocolos

El conjunto de protocolos que se utilizan en las tres interfaces (radio, S1y X2) E-UTRAN se constituyen en los planos de: usuario y control. Los protocolos del plano de usuario son utilizados a fin de enviar paquetes IP. Mientras los protocolos del plano de control son indispensables para mantener las funciones en las interfaces.

2.2.1.2.1. Protocolos en la interfaz radio

El conjunto de protocolos de la interfaz radio se constituye por las capas de: enlace y física, como se puede apreciar en la Figura 18:

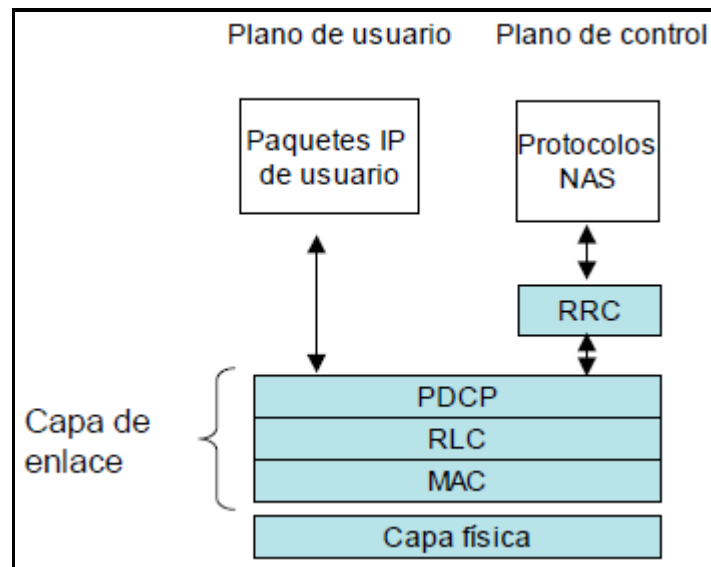


Figura 18: Torre de protocolos en la Interfaz radio [13]

- Capa de enlace: Está constituida por tres subcapas que son:
 - Packet Data Convergence Protocol (PDCP): Las funciones principales que se destacan en este protocolo o capa son:
 - Proporciona el punto de acceso al servicio portador radio (RB), se debe destacar que cada RB tiene un PDCP asociado.
 - Compresión de cabeceras de los paquetes IP.
 - Garantiza la confidencialidad e integridad de la información a través de procesos de cifrados.
 - Agrega un número secuencial en la cabecera a fin de identificar el paquete IP enviado y de la misma manera se permita entregar de manera ordenada dichos paquetes en el receptor.
 - Radio Link Control (RLC): La función principal que se destaca este protocolo es el envío íntegro los paquetes PDCP entre el eNB y el equipo de usuario. Para el efecto, este protocolo debe realizar las siguientes funciones:

- Corrección de errores a través de mecanismos Automatic Repeat ReQuest (ARQ).
- Concatenación, segmentación y re ensamblado.
- Entrega ordenada de paquetes PDCP a capas superiores (a excepción de procesos de handover).
- Detección de duplicados y detección /recuperación de errores en el protocolo.

Se debe destacar que cada RB tiene una entidad RLC asociada.

- Medium Access Control (MAC): La función principal es controlar el acceso al canal radio. Para el efecto, este protocolo debe realizar las siguientes funciones:

- Funciones de scheduling dinámico entre equipos de usuario atendiendo a prioridades.
- Multiplexación de paquetes RLC de varios servicios portadores radio en los canales de transporte ofrecidos por la capa física.
- Control de errores a través del método Hybrid ARQ – HARQ.

Se debe destacar que los servicios de transferencia que ofrece la capa MAC hacia la capa RLC se les conoce como canales lógicos. Una única instancia MAC debe estar asociado a una celda.

- Capa física: Las funciones principales que se destacan en este protocolo o capa son:

- Encargada de la transmisión a través del canal radio, codificación de canal, modulación, procesado asociado a las técnicas de múltiples antenas de transmisión / recepción.
- Mapeo de la señal a los recursos físicos frecuencia / tiempo.

Se debe destacar que en el enlace ascendente la capa física trabaja en el esquema single carrier OFDMA, mientras que en el descendente se basa en OFDMA.

- Plano de Control: Trabaja sobre las capas de: enlace y física como se puede apreciar en la Figura 18. Los protocolos del plano de control son:
 - Radio Resource Control – RRC: Encargada de la conexión de control entre el eNB y el equipo de usuario. Para el efecto, destacan las siguientes funciones:
 - Mecanismos de gestión de los servicios portadores radio, se pueden citar como ejemplos: señalización para el establecimiento / liberación / modificación de los portadores radio.
 - Movilidad se puede citar como ejemplo el proceso de handover.
 - Difusión de configuración del sistema y notificación de los terminales que no cuentan con la conexión RRC establecida.
 - Protocolos NAS: Se limitan entre la red MME en la red troncal hasta el equipo de usuario. Mediante el proceso de encapsulación, como parte de los mensajes RRC, los mensajes del protocolo NAS son transportados a través de la interfaz radio. Las funciones más relevantes de este protocolo son: autenticación, autorización, gestión de movilidad de los terminales que no tienen conexión establecida RRC entre otros.

2.2.1.2.2. Protocolos en las interfaces S1 y X2

Los protocolos de las interfaces S1 y X2 está constituida por las capas de red: radio y de transporte, como se puede apreciar en la Figura 19:

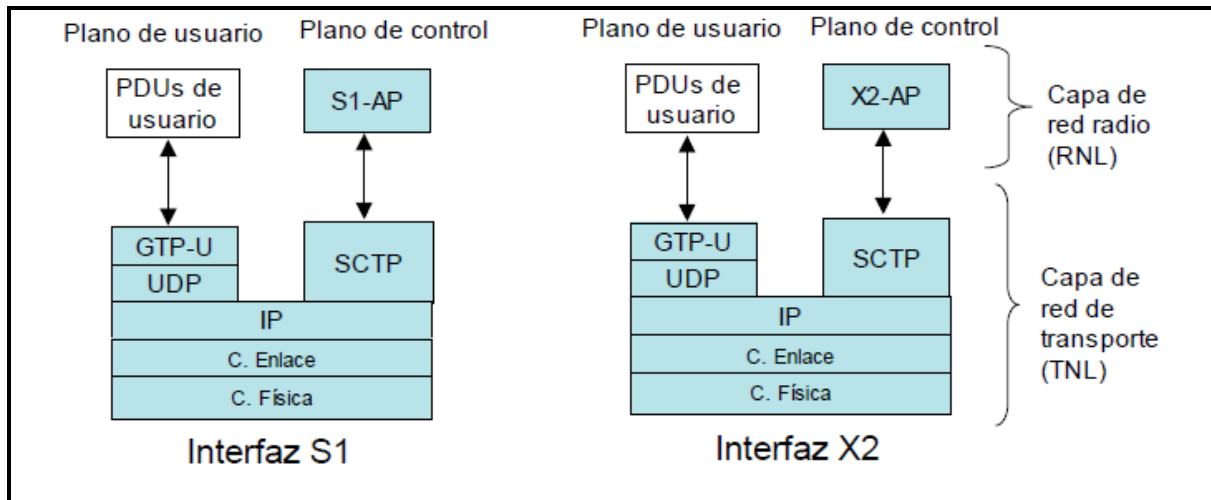


Figura 19: Conjunto de protocolos de las Interfaces S1 y X2 [13]

Esta composición, tiene como fin aislar las funciones específicas de un determinado sistema de comunicación sea UMTS o LTE (protocolo RNL), de otras que dependen de la tecnología de transporte tales como: IP, ATM (protocolo TNL).

Tanto en las interfaces S1 y X2, el plano de usuario trabaja con un conjunto de protocolos similares, mismos que se procederán a describirlos a continuación:

- GPRS Tunneling Protocol - User Plane (GTP-U): Es un protocolo heredado de GPRS. Entre las funciones principales de este protocolo destacan las siguientes:
 - Multiplexa los paquetes IP de múltiples usuarios. Se transporta sobre UDP / IP.
- SCTP: Protocolo de transporte similar a los protocolos TCP y UDP. Las funciones relevantes de este protocolo se describen a continuación:
 - Cuenta con mecanismos de control de flujo y de gestión en la conexión.
 - Incorpora soporte para multihoming, es decir los nodos participantes pueden disponer de múltiples direcciones IP.
 - Multi-streaming, es decir múltiples flujos pueden enviarse en paralelo en el seno de una misma asociación.

En cuanto a la interfaz S1 del plano de control se explicó detalladamente en el punto 2.2.1.1.3. Referente a la interfaz X2 en lo que refiere al plano de usuario, el

protocolo que se utiliza es conocido como X2 Application Part (X2-AP), a través de éste se envía los paquetes IP que contienen: voz, video, datos entre otros. En las siguientes figuras se puede apreciar los protocolos de los planos de: usuario y control en E-UTRAN.

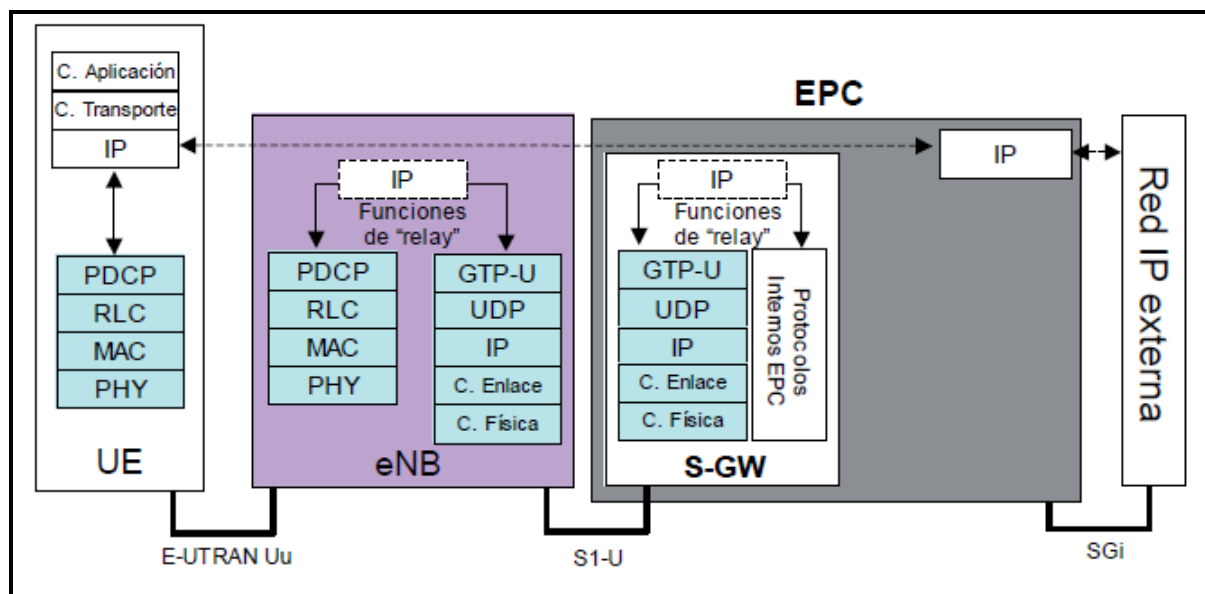


Figura 20: Conjunto de protocolos del plano de usuario en E-UTRAN [13]

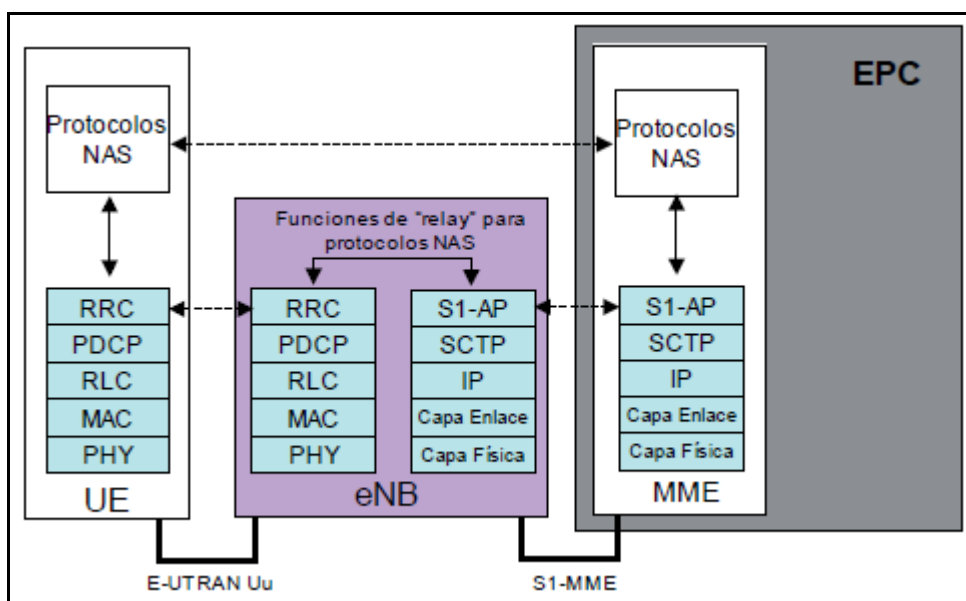


Figura 21: Conjunto de protocolos del plano de control en E-UTRAN [13]

2.2.2. ARQUITECTURA DE LA RED TRONCAL DE PAQUETES EVOLUCIONADA (ENVOLVED PACKET CORE – EPC)

Una de las fortalezas de la arquitectura EPC es que brinda sus servicios IP, a través de estos servicios, permite el acceso tanto a redes 3GPP tales como: GERAN y UTRAN, así como también a las que no pertenecen a 3GPP tales como: CDMA 2000, WiMAX, 802.11.

La arquitectura de la red troncal EPC como se puede apreciar en la Figura 22, está constituida por entidades lógicas es decir entidades funcionales.

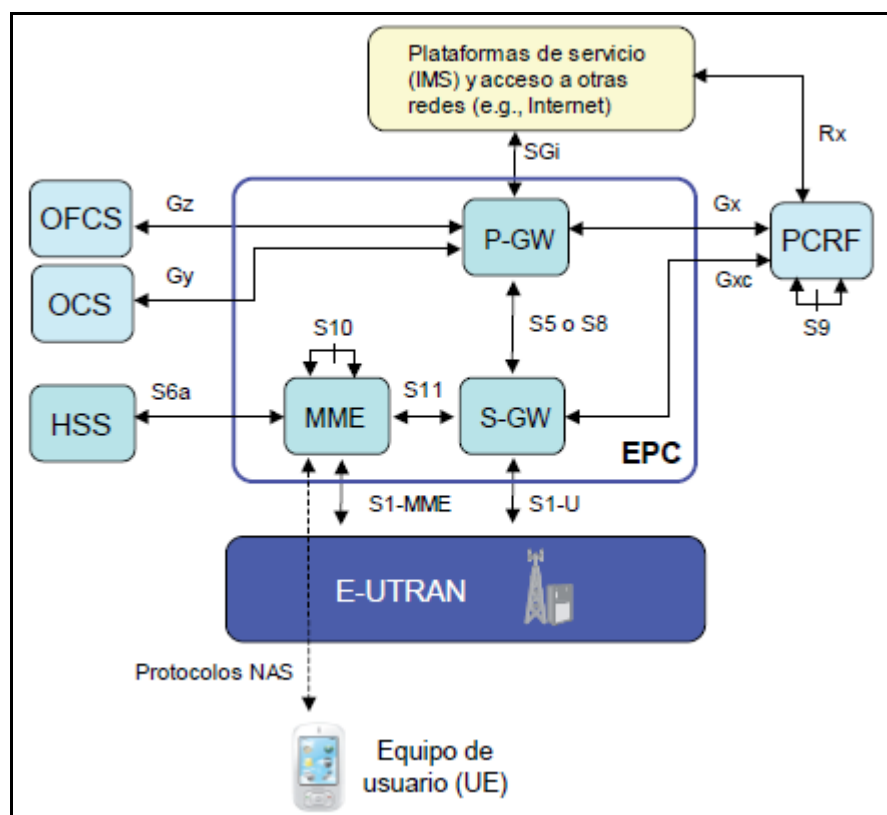


Figura 22: Arquitectura principal de la red troncal EPC [13]

Como se puede apreciar, el núcleo o core de este sistema está constituido por tres elementos más HSS, quienes se encargan de proveer el servicio de conectividad IP a los equipos de usuario. Dichos equipos se conectan mediante E-UTRAN y las redes externas a su vez se conectan a la red troncal. Los elementos son:

- Mobility Management Entity – MME

- Serving Gateway S-GW
- Packet Data Network Gateway P-GW
- Home Subscriber Server HSS

Los elementos S-GW y P-GW involucran las funciones incorporadas en el plano de usuario, mientras tanto el elemento MME encargada de la señalización del plano de control.

Como se analizó en temas previos, mediante la interfaz S1 (constituida por S1-MME y S1-U) interconecta a E-UTRAN con EPC. A continuación, se procederá a detallar las interfaces que son utilizados para interconectar a los diferentes elementos:

- Interfaz S11: Interfaz que es aprovechada por el elemento MME a fin de controlar los procesos de transferencia del plano de usuario de red LTE con la red S-GW
- Interfaz S6a: Interfaz que es aprovechada por el elemento MME a fin de establecer conexión con la red HSS; ésta conexión es relevante ya que se accede a la información relacionada a los usuarios, que se encuentren previamente autorizados.
- Interfaz S10: Mediante ésta interfaz los elementos MME pueden mantener comunicación entre sí.
- Interfaz SGi: A través de ésta interfaz el elemento de red P-GW establece la interconexión de la EPC hacia plataformas de servicios, como ejemplo se puede citar a plataformas IMS.
- Interfaz S5: A través de ésta interfaz se conectan las entidades de red: P-GW y S-GW, siempre y cuando pertenezcan a un mismo operador.
- Interfaz S8: A través de ésta interfaz se conectan las entidades de red: P-GW y S-GW, siempre y cuando no pertenezcan a un mismo operador; además de proporcionar el servicio de roaming o itinerancia.
- Interfaz Gx: A través de esta interfaz el elemento PCRF gestiona los servicios portadores EPS de LTE a través de envío de reglas de uso, mismos que sirve para la configuración de la operación de unas funciones específicas del plano de usuario de la entidad de red P-GW, como ejemplo

se puede citar las funciones que limitan la tasa de transferencia en bits/s de los servicios portadores.

- Interfaz Rx: Ésta interfaz permite el acceso al elemento PCRF desde las plataformas de servicios externos, como ejemplo se puede citar a plataformas IMS. Una de las funciones principales de la interfaz Rx es ofrecer el control a fin que los servidores externos faciliten la información relacionada a los servicios que son requeridos por los usuarios.
- InterfaZ Gz: A través de esta interfaz la entidad de red P-GW interactúa directamente con OFCS.
- Interfaz Gy: A través de esta interfaz la entidad de red P-GW interactúa directamente con OCS.

La entidad de red Policy and Charging Rules Function – PCRF es un elemento clave para los sistemas 3GPP, principalmente para LTE. Éste elemento forma parte de PCC, utilizado para controlar los mecanismos de tarificación que ofrece LTE.

Las entidades Offline Charging System – OFCS y Online Charging System – OCS conforman el núcleo o core de los mecanismos de tarificación de la red.

2.2.2.1. Entidades de red de EPC

Los tres elementos del núcleo de EPC que son: MME, S-GW y P-GW; más HSS, serán analizados a continuación:

2.2.2.1.1. Mobility Management Entity – MME

MME se caracteriza por ser el elemento fundamental del plano de control de la red LTE. Así mismo, se debe destacar que a todo terminal registrado en LTE le corresponde una determinada entidad MME. La elección de un determinado MME tiene que ver con aspecto como la ubicación geográfica del terminal de red al igual que el método de balanceo de cargas. Las funciones relevantes de esta entidad se describen a continuación:

- Identificación, autenticación y autorización: La entidad de red MME es quien se encarga del control de acceso a la red a través de la identificación,

autenticación y autorización de los usuarios que se conectan mediante E-UTRAN. Esto es posible gracias a los datos que le provee el elemento HSS a MME.

- Gestión de los servicios portadores EPS: MME se encarga de la señalización a fin de establecer, mantener, actualizar y liberar los servicios portadores. Cabe señalar que sobre este tipo de servicios se envía paquetes IP entre los terminales y la red externa.
- Gestión de movilidad de los usuarios en estado *idle*: Como se explicó en temas anteriores, a fin de realizar un seguimiento y contar con la información de localización de todos los usuarios que se encuentren registrados en la red *LTE* incluyendo a los usuarios que no mantengan una conexión establecida con *E-UTRAN*, es necesario contar con el procedimiento conocido como *tracking area update* y definición de áreas de seguimiento - *tracking áreas*.
- Soporte de movilidad entre *EPS* y redes *3GPP*: Existirán desde luego equipos de usuario que se conecten mediante las redes de acceso *E-UTRAN* o *GERAN / UTRAN*; y, a fin de solventar la movilidad de los usuarios será factible el intercambio de información relevante de los usuarios entre las entidades MME y SGSN. Los procesos de: señalización, intercambio de información, reubicación del plano de usuario en las entidades de la red troncal se los realiza mediante la interfaz S3.
- Terminación de los protocolos de señalización *Non Access Stratum – NAS*: El conjunto de protocolos *NAS* transitan entre la entidad de red MME y el equipo de usuario, cuyas funciones principales de estos protocolos son:
 - Control de acceso a la red *LTE*.
 - Gestión de las conexiones a redes externas y el establecimiento de servicios portadores EPS.

- Gestión de movilidad de los terminales que se encuentran en estado *idle*.

2.2.2.1.2. Serving Gateway S-GW

A través de este elemento existe la interconexión entre *E-UTRAN* y *EPC*. Tiene características similares a la entidad de red MME como lo son: cada usuario de LTE cuenta con un S-GW asignado en la EPC; además, dicha asignación se establece mediante la ubicación geográfica. Entre las funciones relevantes del elemento S-GW destacamos las siguientes:

- Proporcionar punto de anclaje: S-GW proporciona un punto de anclaje en la red troncal EPC referente a la movilidad del terminal entre eNB. Lo que implica que: en un proceso de handover varía únicamente el servicio portador S1 entre los eNB involucrados y el S-GW, manteniéndose constante el plano de usuario entre S-GW y P-GW. La funcionalidad de punto de anclaje también aplica para la gestión de movilidad de *GERAN* y *UTRAN*.
- Almacenamiento temporal de los paquetes IP de los usuarios: A pesar de que exista conexiones y servicios portadores EPS, un equipo de usuario puede estar en estado *idle*, lo que implica que no esté conectado a un eNB. Al llegar información de la red externa a este usuario, la entidad S-GW actúa de la siguiente manera:
 - Almacena temporalmente los paquetes IP
 - Inicia el restablecimiento de plano de usuario hasta el equipo de usuario.
- Encaminamiento del tráfico de usuario: S-GW almacena información y funciones de encaminamiento para dirigir el tráfico de subida (desde los equipos de usuario hasta la entidad P-GW correspondiente) y el tráfico de bajada desde P-GW hasta eNB. Es importante señalar que un usuario puede

contar con varias conexiones establecidas a múltiples entidades P-GW a la vez, sin embargo, el tráfico generado pasa por una única entidad S-GW.

2.2.2.1.3. Packet Data Network Gateway P-GW

Elemento encargado de establecer conexión entre la red LTE y redes externas. Los paquetes IP formados por los usuarios son transmitidos a través del elemento P-GW y viceversa. Un terminal siempre contará con al menos un elemento P-GW. Las principales funciones del elemento P-GW son:

- Control de políticas: Normativas de uso de la red y control de tarificación a los servicios asociados a un determinado equipo de usuario. Para el efecto, el elemento P-GW cuenta con filtros que permiten asociar los paquetes IP de usuario con el servicio portador EPS.
- Asignación de direcciones IP: Asignación de direcciones IP pueden ser: IPV4, IPV6 o el par (IP4, IPV6). Para la asignación de la dirección IP se utiliza el protocolo NAS o bien protocolos propios de IP como es DHCP.
- Punto de anclaje: Actúa como punto de anclaje entre redes LTE y GERAN / UTRAN.

2.2.2.1.4. Home Subscriber Server HSS

Este elemento es un repositorio de base datos donde se registra la información relevante de los usuarios, tales como: identificadores de servicio, seguridad, ubicación del terminal e información relevante a fin de proveer los servicios suscritos en el contrato. Esta información es gestionada y actualizada a través de las entidades quienes proveen los servicios de conectividad, siendo éstas las siguientes: MME, SGSN, MSC y servidores del subsistema IMS. El elemento HSS se constituyó sobre las entidades definidas en GSM que son: Home Location Register – HLR y Authentication Center – AuC, es por ello que las funciones del

elemento HSS contienen las funciones de las entidades HLR / AuC, necesarias para el funcionamiento del dominio de paquetes EPC y del dominio CS.

2.2.2.2. Interfaces de EPC

2.2.2.2.1. Interfaz SGi

Esta interfaz permite la conexión entre la pasarela P-GW de la red LTE con las redes externas IP (redes: públicas o privadas). Tiene como característica la interconexión a redes: IPv4 e IPv6 convencional. Los modelos de conexión entre las redes LTE y la externa son transparente y no transparente. Estos modelos se los puede apreciar en la Figura 23:

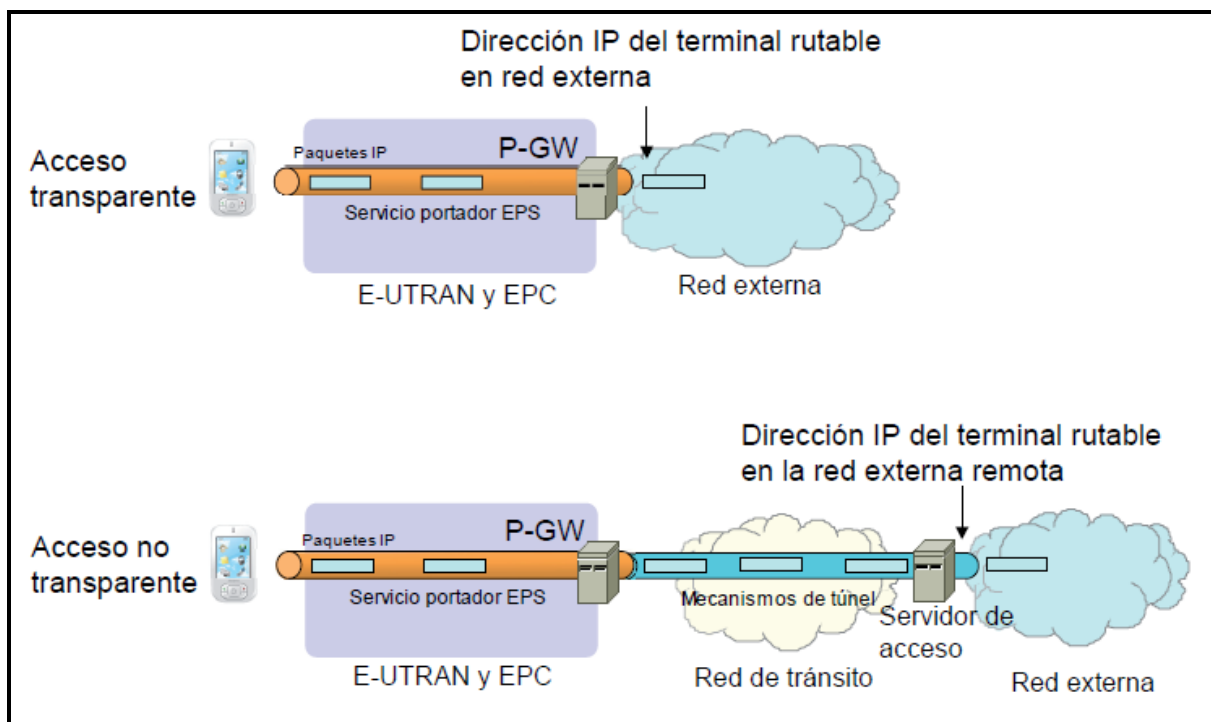


Figura 23: Modelos de interconexión entre las redes LTE y externa [13]

- Acceso transparente: Se destaca debido a que la dirección IP otorgada al terminal es válida tanto en la interfaz SGi como en la red externa, manteniéndole visible en la red externa. El elemento P-GW proveerá de acceso a través de la dirección IP del terminal.

- Acceso no transparente: El conjunto de direcciones que utilizan los equipos de usuario pertenecen al conjunto de direcciones de una red externa remota. Es por ello que probablemente, la pasarela P-GW tenga como funciones de autenticación del usuario y asignación de direcciones IP dinámicas pertenecientes a la red remota. El método de comunicación entre las redes LTE y remota puede ser túnel IP (IPsec, GRE, entre otros).

2.2.2.2.2. Interfaces S5 y S8

Estas interfaces brindan el soporte para la transferencia de paquetes entre las entidades P-GW y S-GW; y, viceversa. La diferencia radica en que la interfaz S5 es utilizado siempre y cuando pertenezcan a un mismo operador; mientras que la interfaz S8 cuando no pertenezcan a un mismo operador; además de proporcionar el servicio de roaming o itinerancia.

Estas interfaces admiten las implementaciones basadas en:

- Protocolo GTP: Desempeña funciones relevantes tales como: crear, eliminar actualizar, así como también la gestión del cambio del servicio portador entre S-GW y P-GW.
- Protocolo PMIPv6: A diferencia del protocolo GTP, éste no administra servicios portadores entre S-GW y P-GW; siendo el servicio de movilidad la caracteriza fundamentalmente entre el S-GW y P-GW (todos los datos son transportados a través de un mismo túnel), por ende, no cuenta con funciones a fin de señalar parámetros de QoS.

2.2.2.2.3. Interfaz S11

La entidad de red MME a través de esta interfaz, controla la operativa del plano de usuario en la red troncal EPC. Entre las gestiones que destacan en esta interfaz son: crear, eliminar, actualizar y cambiar los servicios portadores que los terminables mantienen establecidos en la red troncal LTE.

La interfaz S11 actúa frente al inicio de los distintos tipos de eventos que involucran la señalización entre el terminal y la red troncal (registro de un terminal en la red LTE, indicación de handover entre otros), así como también de los eventos originados desde la red troncal EPC (notificación de que existe paquetes IP almacenados temporalmente en S-GW mismos que deben ser enviados a un terminal en estado *idle*, actualización de servicios portadores iniciada por la pasarela P-GW, entre otros).

Esta interfaz da soporte frente a procedimientos de *handover* que implique la reubicación de S-GW, la entidad MME controla los mecanismos de transferencia de paquetes entre las dos posibles S-GW implicadas.

2.2.2.2.4. Interfaz S10

Esta interfaz es utilizada para la conexión entre dos MME. Se caracteriza fundamentalmente por proveer del mecanismo de reubicación de la entidad MME. Para el efecto el MME que gestiona a un equipo de usuario específico debe realizar el cambio, ésta entidad transfiere la información relevante a otra entidad MME. La información del usuario involucra: seguridad, características del terminal, gestión de movilidad entre otros.

2.2.2.2.5. Interfaz S6a

Por esta interfaz se transmite la información de la base de datos HSS y la entidad de plano de control MME de la red troncal EPC. Mediante esta interfaz se da soporte a las siguientes funciones:

- Actualización de información respecto a la gestión de localización: Dentro de la base de datos HSS se encuentra el identificador ID del nodo MME. Esta información es actualizada por el nodo MME mediante la interfaz S6a, a fin de que, si un determinado terminal se conectare a un nuevo MME, éste pueda consultar la información relevante al nodo MME que previamente prestó el servicio al terminal.

- Autorización de acceso a la red LTE: Mediante la consulta a la base de datos de HSS, la entidad MME conoce los servicios que mantiene un determinado usuario establecidos a través de la suscripción del contrato. La entidad MME al conocer los servicios autoriza la conexión de un determinado usuario hacia la red externa.
- Autenticación de los usuarios: Al igual que el proceso anterior, la entidad MME realiza la consulta a la base de datos de HSS a fin de determinar si un usuario pertenece o no a la red LTE, a este proceso también se lo conoce como vector de autenticación EPS.
- Almacenamiento de información relevante a pasarelas P-GW en la base de datos de HSS: Toda vez que las pasarelas P-GW se encuentran prestando servicios al usuario y la información almacenada sirve de soporte a los mecanismos de movilidad entre LTE y otras redes que no pertenecen a 3GPP.

2.2.2.3. Protocolos en EPC

En esta sección se procederá a analizar el conjunto de protocolos que utilizan las interfaces de la EPC, analizados previamente. Se debe destacar que el análisis de realizará en base a los protocolos utilizados, toda vez que varios interfaces están basadas en conjunto de protocolos similares:

2.2.2.3.1. Protocolo GTP-U

Bajo este protocolo trabajan todas las interfaces para el transporte de información de plano de usuario entre los diferentes elementos de la red troncal EPC, a excepción de la interfaz S5 y S8 establecida por PMIPv6. Este protocolo también trabaja con las interfaces S4 y S12 quienes forman parte de la solución de *interworking* entre EPC y redes 3GPP; Las interfaces que trabajan con el protocolo GTP-U como se resumen en la Figura 24:

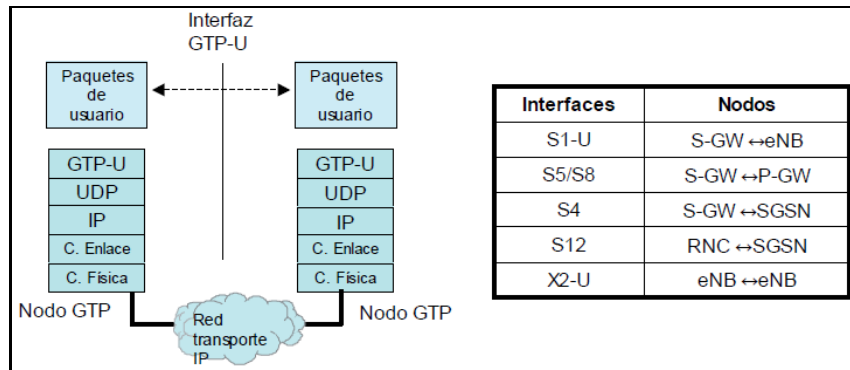


Figura 24: Interfaces que trabajan bajo el protocolo GTP-U [13]

3GPP desarrollo este protocolo a fin de implementar el servicio GPRS. Por lo expuesto, los planos de usuarios entre: los nodos de red del dominio GPRS y la interfaz lu-PS de UTRAN son soportados en este protocolo.

Así mismo, este protocolo posee mecanismos de encapsulamiento a fin de enviar paquetes IP entre los nodos de la red. Es así que, los paquetes pertenecientes a un determinado servicio portador EPS, son transportados quienes cuentan con un identificador de túnel único - *TEID*. En la Figura 25 se puede apreciar la implementación del túnel entre S-GW y P-GW.

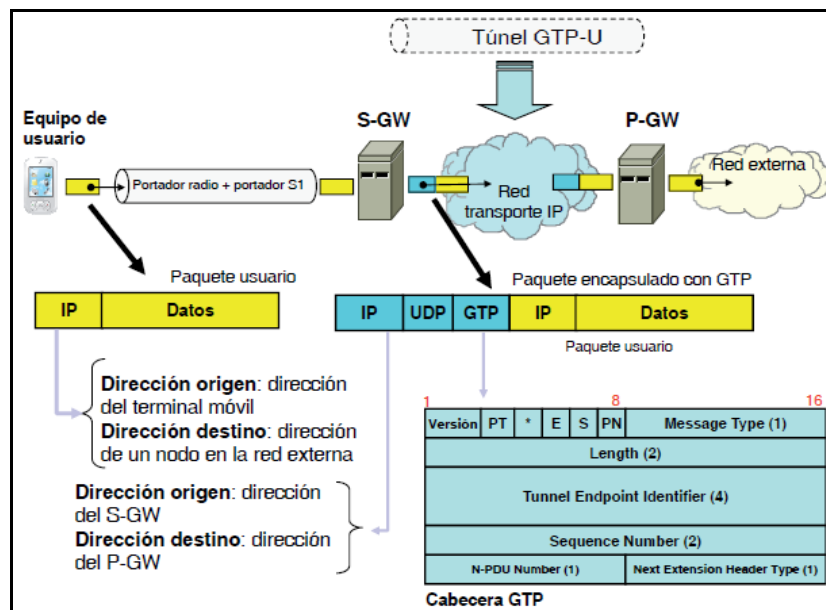


Figura 25: Implementación de túnel entre S-GW y P-GW [13]

De esta ilustración, se procede a explicar el procedimiento ejecutado:

- Los paquetes IP del usuario son transportados a S-GW mediante los servicios portadores: radio y S1.
- La entidad S-GW recibe como información las direcciones IP tanto del equipo terminal como del equipo receptor de la red externa. En virtud que las éstas direcciones IP no forman parte del conjunto de direcciones de la red de transporte, surge la necesidad de establecer el túnel.
- La entidad S-GW a fin de enviar el paquete de usuario hacia la entidad P-GW, lo encapsula a través del protocolo GTP-U.
- El encapsulamiento cuyo tamaño es de 6 bytes, consiste en agregar la siguiente información: identificador de túnel *TEID*, identificadores de secuencia y longitudes del paquete. De esta forma la IP de origen ahora es de la entidad S-GW y la de destino es de la entidad P-GW, transportándose el paquete GTP-U entre éstas entidades.
- Al llegar a la entidad P-GW, inicia el proceso de extracción del paquete IP a fin de ser introducida en la red externa.

2.2.2.3.2. Protocolo GTP-C

Bajo este protocolo trabajan las interfaces: S3, S4, S5/S8, S10, S11 Y S16. Las interfaces que trabajan con el protocolo GTP-U se resumen en la Figura 26:

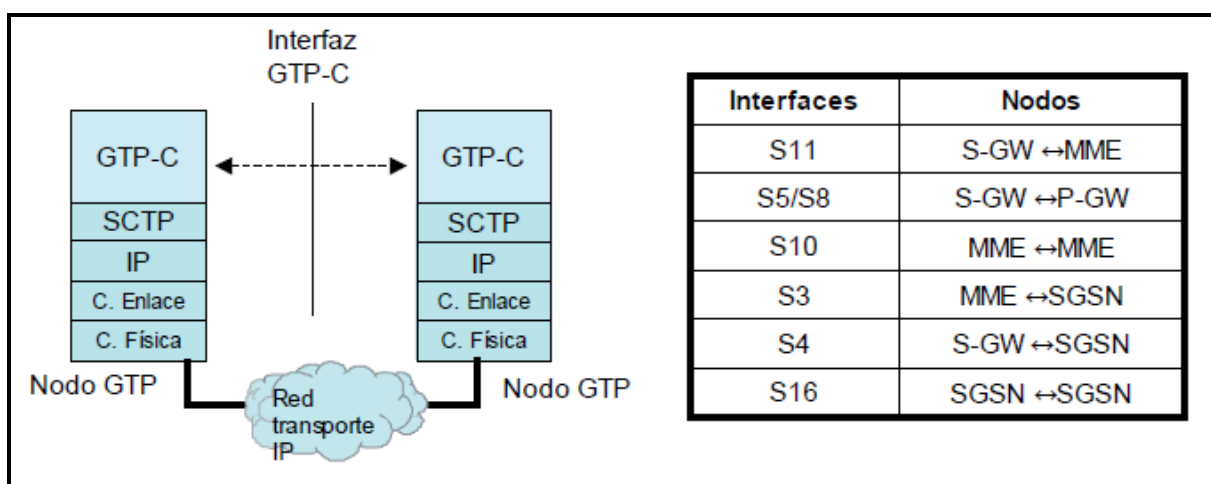


Figura 26: Interfaces que trabajan bajo el protocolo GTP-C [13]

Este protocolo además de la gestión de túneles GTP-U, abarca otras funciones, siendo estas las siguientes:

- Gestión de sesiones: Mediante los procedimientos de señalización determinados para GTP-C, la red administra la creación de túneles GTP-U entre las entidades de red. Estos túneles pertenecen a la gestión de sesiones de red, proceso que conlleva al mantenimiento, modificación y liberación de conexiones PDN.
- Gestión de movilidad: Involucra a gestiones tales como: transferencia de contextos de información de los usuarios entre las entidades de red, cuando se presenten casos de reubicación de las mismas.

2.2.2.3.3. Protocolo Diameter

Este protocolo, es considerado como el mejoramiento del protocolo *RADIUS*; por ende, cuenta con funciones robustas en relación a *RADIUS*, tales como: seguridad, robustez a pérdida de mensajes, extensibilidad que permite el uso de este protocolo para aplicaciones fuera de *Authentication, Authorization, and Accounting – AAA*. Bajo este protocolo trabajan varias interfaces. Las interfaces que trabajan con el protocolo GTP-U se resumen en la Figura 27:

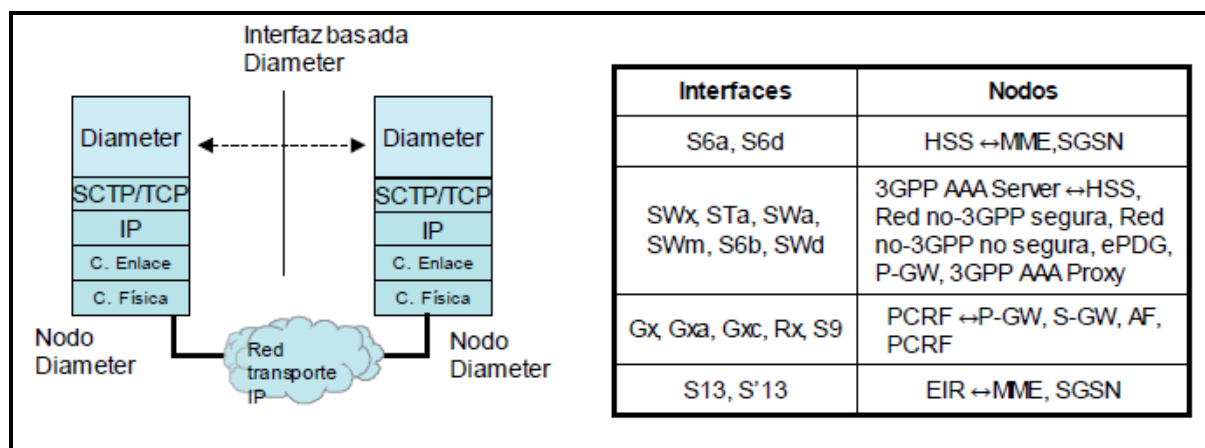


Figura 27: Interfaces que trabajan bajo el protocolo Diameter [13]

Este protocolo está constituido por:

- Protocolo base: Encargado de las siguientes funcionalidades:
 - o Formatos de los mensajes y elementos de información genéricos.
 - o Descubrimiento de capacidades de las entidades *Diameter*.
 - o Mecanismos de transferencia de mensajes.
 - o Mecanismos de seguridad, entre otros.

- Número de extensiones llamadas aplicaciones: Encargado de definir los procedimientos indispensables a fin de ajustar el uso de Diameter a ciertas funcionalidades específicas. Se pueden citar las siguientes aplicaciones Diameter: para servicios AAA- *Network Access Server Application* y para la implementación de sistemas de tarificación online – *Credit Control Application*.

2.2.2.3.4. Protocolo ProxyMIPv6 - PMIPv6

Este protocolo se encarga de gestionar la movilidad de forma transparente al equipo de usuario, a este proceso de administración se determina también como “*network-based*”, en la Figura 28 se puede apreciar el protocolo PMIPv6 junto a los componentes funcionales.

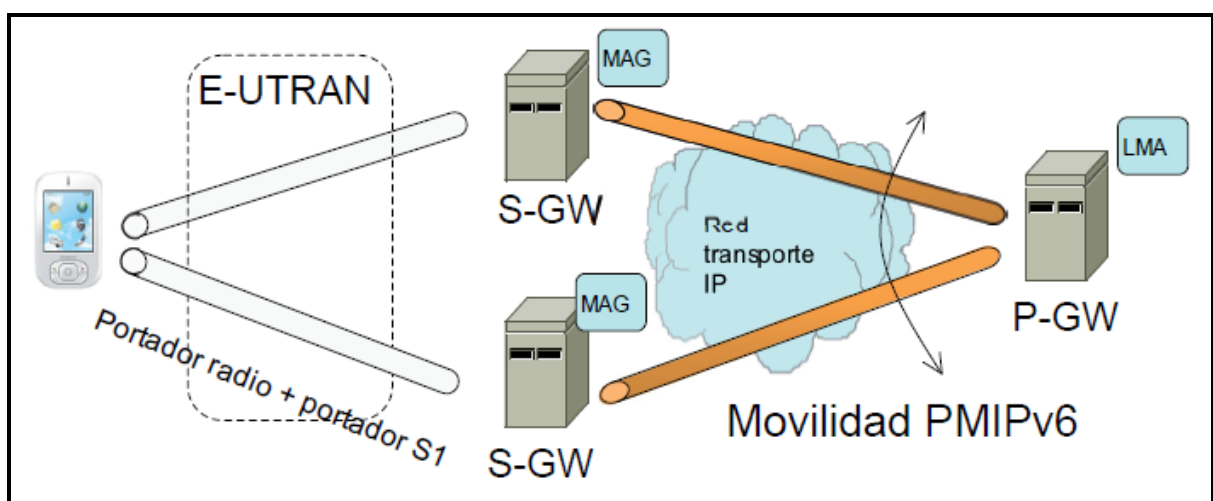


Figura 28: Protocolo PMIPv6 junto a los componentes funcionales [13]

Este protocolo está constituido por los siguientes componentes:

- Local Mobility Anchor- LMA: Utiliza la entidad de red P-GW y cumple funciones similares a Home Agent – HA en MIP. A través del proceso de encapsulamiento, LMA mantiene la asociación entre las direcciones IP tanto del terminal como el receptor de los paquetes del usuario.
- Mobile Access Gateway – MAG: Utiliza la entidad de red S-GW. La dirección IP de envío de los paquetes IP es la dirección del router mismo que alberga la funcionalidad MAC.

Consideraciones relevantes:

- La dirección IP del terminal no forman parte del conjunto de direcciones de la red de transporte.
- La transferencia de los paquetes IP entre la entidad de red S-GW y los equipos de usuario no se utiliza el protocolo PMIPv6.

Las interfaces que trabajan con el protocolo PMIPv6 se resumen en la Figura 29:

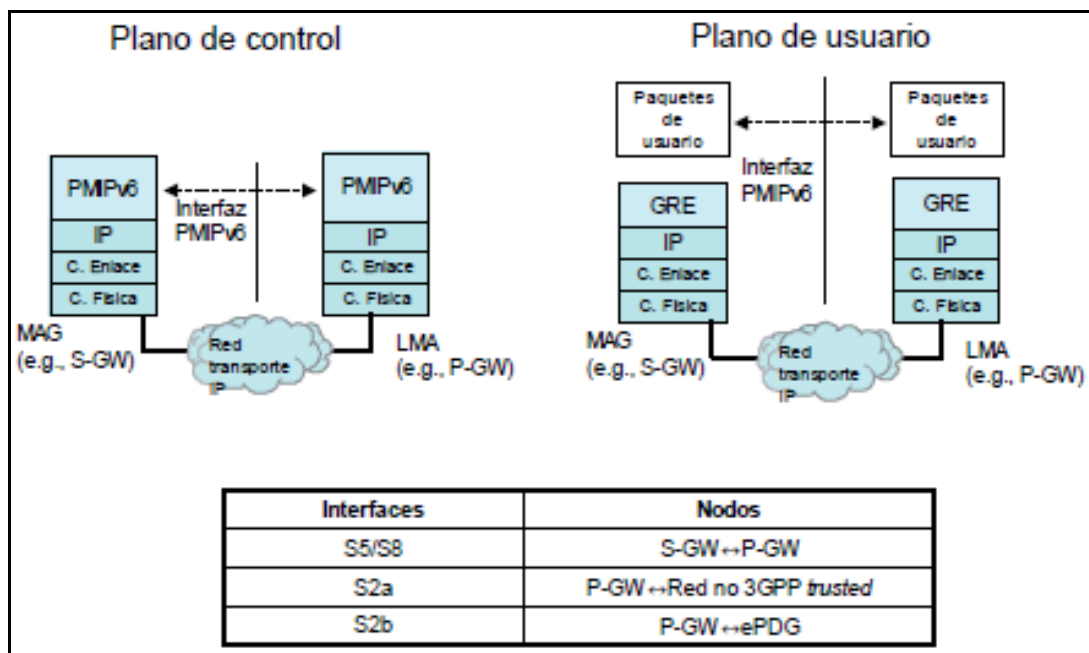


Figura 29: Interfaces que trabajan bajo el protocolo PMIPv6 [13]

- Plano de control: Radica en mensajes de señalización especificados en el protocolo que se envían en los paquetes IP intercambiados entre MAG y LMA. Mediante estas señalizaciones se puede controlar las asociaciones de direcciones y los túneles requeridos.
- Plano de usuario: Establece el túnel a fin de enviar paquetes IP de los usuarios entre MAG y LMA. Para el efecto, estos paquetes son encapsulados a través del protocolo *Generic Routing Encapsulation – GRE*, añadiendo cabeceras, mismas que permitirán relacionar cada paquete con su determinada conexión PDN al cual pertenece.

El protocolo PMIPv6 brinda una gran ventaja que es la movilidad entre LTE y redes no pertenecientes a 3GPP. Cabe señalar que esta funcionalidad también cumple las interfaces S5 y S8.

2.2.2.3.5. Protocolo NAS

Estos protocolos desarrollados concretamente para E-UTRAN y son soportados entre el equipo de usuario y el nodo MME, como se puede apreciar en la Figura 30:

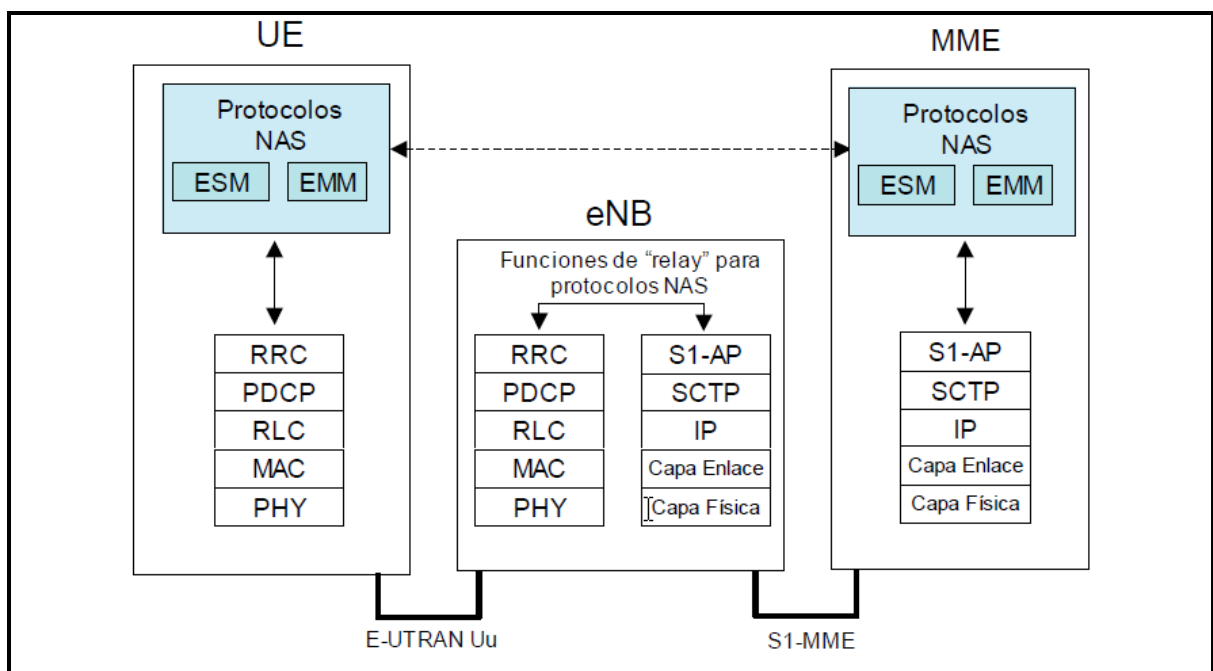


Figura 30: Conjunto de protocolos NAS entre el Equipo de Usuario y MME [13]

Los protocolos NAS: EMM y ESM se especifican a continuación:

- EMM para la gestión de movilidad: Las funcionalidades principales que ofrece este protocolo son:
 - Proporciona procedimientos de control de movilidad de un terminal que utiliza E-UTRAN para el acceso a la red troncal.
 - Proporciona gestionar y cancelar a un determinado usuario en LTE.
 - Seguimiento de Actualización de Área - *Tracking Area Update*.
 - Proporciona el procedimiento *paging* a fin enviar mensajes de señalización a un terminal que se encuentra en estado *idle*.
 - Contempla el procedimiento de petición de servicio – *Service Request*, petición realizada por el equipo de usuario a fin de transmitir paquetes IP pendientes. Esta petición permite reactivar el plano de usuario entre la red S-GW y UE.
 - Contempla procedimientos a fin de investigar al equipo terminal para el envío de identificadores por ejemplo: International Mobile Subscriber Identity – IMSI o International Mobile Equipment Identity – IMEI. Éste proceso contempla la autenticación de ambas partes del usuario y LTE.
 - Contempla procedimientos de transporte sobre mensajes NAS soportados por el protocolo EMM. A través de éste procedimiento es posible la transferencia de mensajes SMS mediante la red LTE.
- ESM para la gestión de las sesiones: Las funcionalidades principales que ofrece este protocolo son:
 - Proporciona procedimientos de gestión tales como: activación, desactivación, actualización de los servicios portadores EPS.
 - Contempla aplicar QoS a un determinado flujo de paquetes.
 - Proporciona procedimientos de tal manera que el usuario solicita a la red el establecimiento de la conexión hacia una red externa. En atención a la petición, LTE actúa el servicio portador por defecto con dicha red externa.

- Contiene mecanismos de petición de asignación de recursos. Mecanismos que permiten al usuario noticiar la necesidad de contar con recursos a fin de transferir información con determinadas características QoS. En respuesta a la petición realizada, la red LTE inicia el establecimiento de un servicio portador EPS dedicado.

2.2.3. IP MULTIMEDIA SUBSYSTEM (IMS)

Este subsistema está constituido por varios elementos tales como: servidores, bases de datos, pasarelas que mantienen una conexión entre sí, a fin de proveer servicios de comunicación multimedia (voz, video, llamadas en grupo entre otros) a usuarios de la red LTE, basados en la utilización del protocolo IP.

IMS se originó con el sistema UMTS y posteriormente se extendió a las tecnologías tanto móviles como fijas, siendo estas las siguientes:

- Tecnologías móviles: LTE, 3GPP2, WiMAX, entre otras.
- Fijas: ADSL, cable entre otras.

El modelo de provisión de servicios a través de este sistema, se contempla en tres capas que son: transporte, control y aplicación, tal como se muestra en la Figura 31:

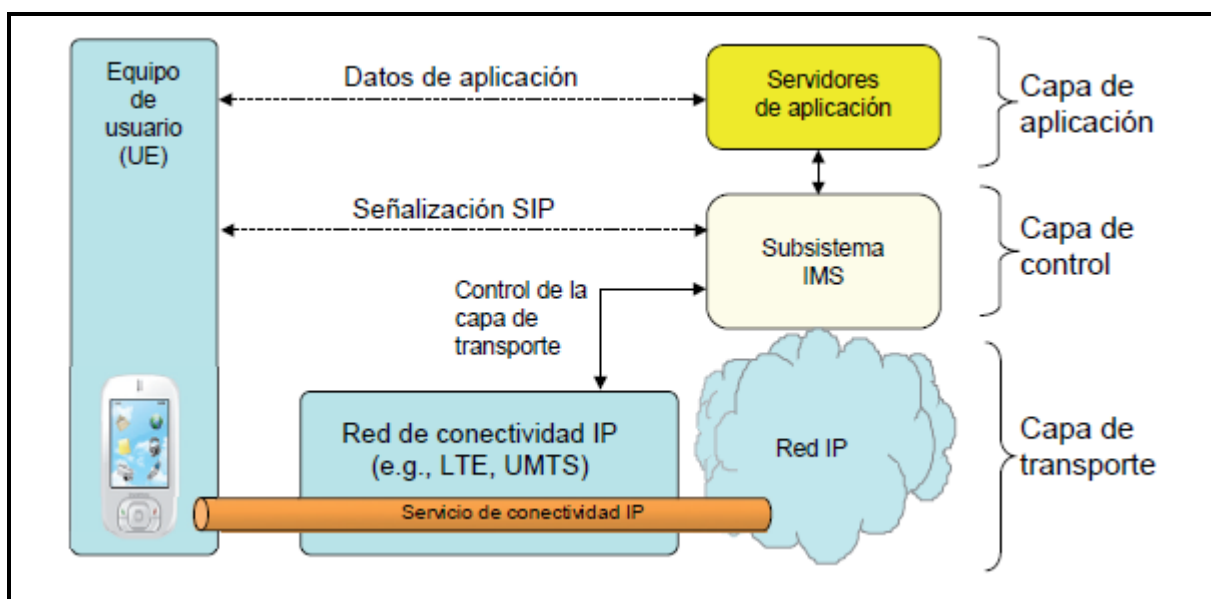


Figura 31: Modelo de provisión de servicios a través del Subsistema IMS [13]

- Capa de transporte: Se refiere específicamente a los servicios de red IP. Así mismo, esta capa facilita el encaminamiento de flujos IP entre los equipos de usuario y el resto de elementos de la red.
- Capa de control: Representan a los servidores de señalización SIP, redes telefónicas convencionales tales como: Gateway, pasarelas VoIP, controladores entre otros. Cabe enfatizar que los servicios IP proporcionados a través de la capa de transporte son controlados mediante la capa de control.
- Capa de aplicación: Representan a los servidores de aplicación de los distintos servicios proporcionados mediante IMS. En esta capa se encuentran otro tipo de plataformas de servicios tales como: redes inteligentes y pasarelas Parlay /OSA. Mediante estas plataformas se hace posible la provisión de servicio desde proveedores de aplicaciones externos, conocidos como *Application Service Providers – ASP*.

Para la comunicación entre un terminal registrado en la red LTE con IMS se utiliza el protocolo SIP enfocado principalmente en la señalización. Este protocolo inicialmente se forjó a fin de y gestionar y liberar sesiones sobre redes IP entre más de dos copartícipes. Este protocolo se encuentra en constante evolución, es así que actualmente cuenta con varias aplicaciones tales como: voz, SMS, mensajería instantánea, MMS, videoconferencia entre otros.

2.2.4. EQUIPO DE USUARIO ^{[13], [21]}

Mediante este componente se pueden acceder a los servicios suscritos en el contrato de la red LTE mediante la interfaz radio. La arquitectura funcional del equipo de usuario de la red LTE es la misma que de los sistemas GSM y UMTS. Está constituido por: la tarjeta universal de circuito integrado - UICC y el equipo móvil - ME, como se puede apreciar en la Figura 32:

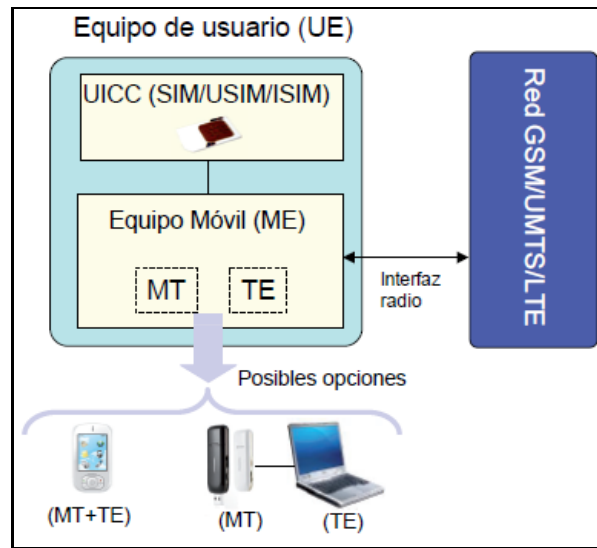


Figura 32: Arquitectura funcional del equipo de usuario de la red LTE [13]

- Módulo de suscripción del usuario: Se materializa a través del uso de la tarjeta inteligente UICC, misma que contiene la aplicación que administra los datos de suscripción de los usuarios a redes 3GPP.
 - Subscriber Identity Module - SIM: Aplicación para acceder a redes GSM.
 - UMTS SIM- USIM: Aplicación para acceder a redes UMTS.
 - IP Multimedia Services Identity Module – ISIM: La aplicación de la tarjeta UICC es ISIM, en ésta se almacenan datos relevantes como por ejemplo las direcciones SIP del usuario, necesarios para la operación de los servicios IMS.

La función principal de contar los elementos USIM y ME separados, es que mediante la SIM / USIM el usuario puede cambiar de terminal manteniendo su identidad.

Dentro del concepto de tarjeta inteligente se refiere estrictamente al circuito integrado, capacidades de comunicación y procesado (elementos de: hardware y software). En el ámbito de procesado una tarjeta inteligente cuenta con varias aplicaciones, entre ellas la SIM y USIM. Estas aplicaciones contienen:

- Estructura de datos tales como: áreas de seguimiento, IMSI del usuario entre otras.
- Conjunto de rutinas como por ejemplo el soporte de mecanismo de autenticación.

El diseño de este tipo de aplicaciones debe garantizar la compatibilidad entre sistemas previos; es así que, una tarjeta USIM no tendría problemas al acceder a una red GSM o LTE.

- Equipo Móvil (ME): Las funciones del equipo de usuario se categorizan en:
 - Terminación Móvil – Mobile Terminal (MT): Encargada básicamente de las funciones propias de la comunicación.
 - Equipo Terminal – Terminal Equipment (TE): Permite interactuar con el usuario para el efecto cuenta con un sin número de aplicaciones.

La separación entre MT y TE es opcional, cuya separación se estableció a fin de flexibilizar el desarrollo de equipos de usuarios más complejos en función de la capacidad de transmisión.

2.3. GESTIÓN DE SESIONES, MOVILIDAD Y SEGURIDAD EN LTE ^[13], [19]-[21]

2.3.1.1. Gestión de Sesiones

La gestión de sesión consiste en la gestión del servicio de conectividad IP que ofrece el sistema LTE. Este servicio de conectividad IP se caracteriza fundamentalmente por ofrecer niveles de calidad de servicio (QoS), este y otros temas serán abordados a continuación.

2.3.1.1.1. Servicio de Conectividad IP

Este servicio permite a un terminal LTE intercambiar información con otros equipos de la red IP externa remota, a este tipo de servicio se le conoce como “conexión

PDN”, en la Figura 33 se puede apreciar el servicio de conectividad IP que provee la red LTE.

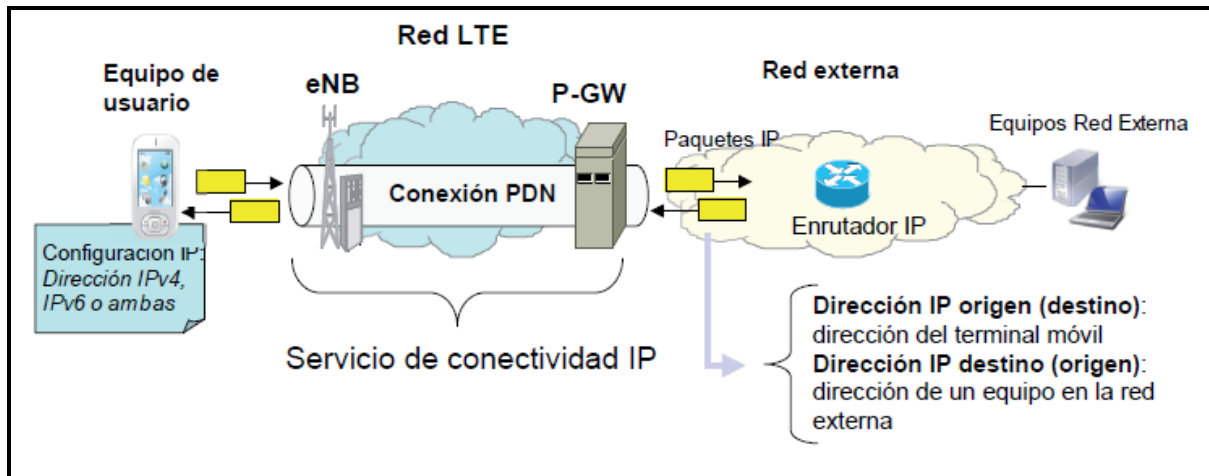


Figura 33: Servicio de Conectividad IP que provee la red LTE – Conexión PDN [13]

La red LTE puede facilitar el acceso a redes externas tales como: públicas, privadas, la red de un proveedor de acceso a Internet (ISP) o a su vez a una red interna definida por la propia operadora de LTE como por ejemplo de servicios IMS. En 3GPP las probables redes externas de paquetes accesibles desde LTE se les conocen como Packet Data Networks (PDNs).

A fin de establecer la conexión con las redes externas de una red LTE, se establece un proceso de identificación a través de etiquetas denominadas *Access Point Name- APN*; éste, está compuesto del código del operador y del país; y, un identificador específico de la red externa a la que se proporciona acceso. Es así que, al establecerse una conexión entre el móvil y la red externa, la red LTE utiliza el APN a fin de determinar la o las pasarelas P-GW que van a ser partícipes en dicha conexión. En la Figura 34 se puede apreciar las conexiones PDN y servicios portadores EPS.

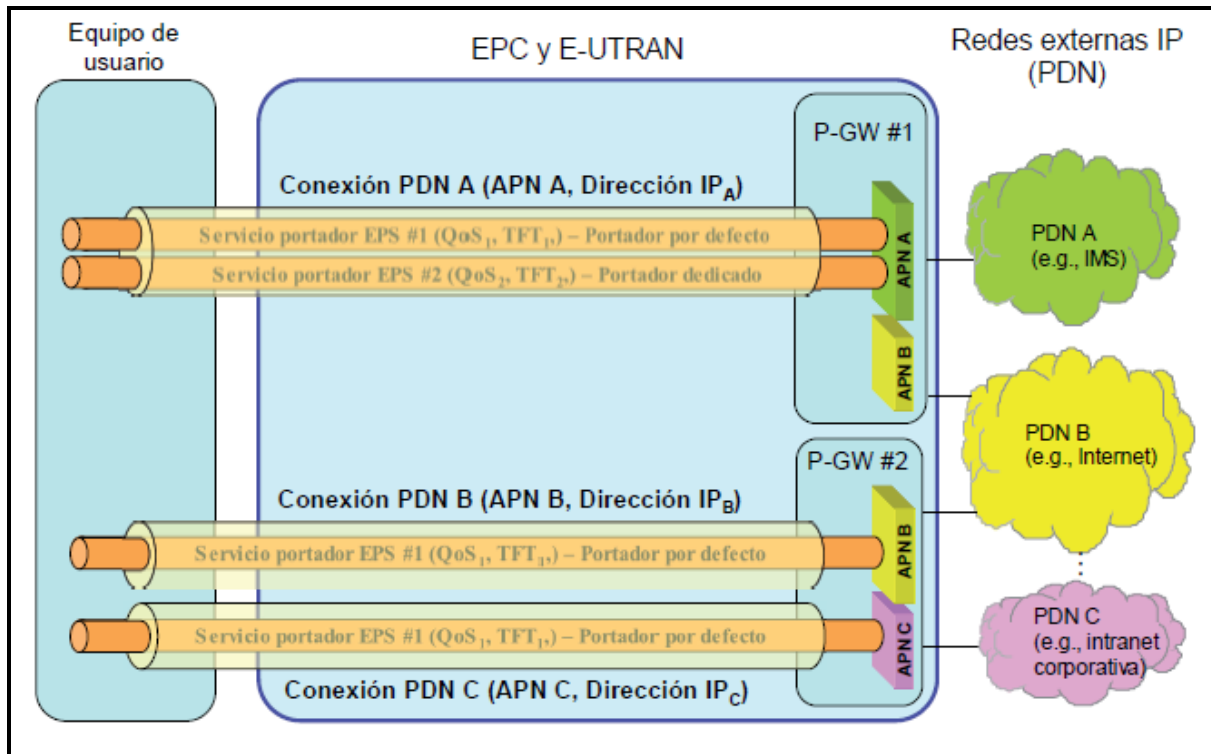


Figura 34: Conexiones PDN y servicios portadores EPS [13]

De la figura expuesta, se procede a realizar las siguientes puntualizaciones:

- Un terminal puede establecer múltiples conexiones PDN a la vez mediante una o varias pasarelas P-GW.
- El control de acceso que cuenta un determinado usuario a una conexión PDN, se establece mediante la suscripción, donde se especifica los APNs autorizados.
- La conexión con un determinado PDN puede realizarlo o el usuario o la red LTE.
- Un terminal LTE puede tener varias direcciones IP asignadas, definiéndose una por cada conexión PDN.

2.3.1.1.2. Modelo de QoS

En la red LTE, el modelo de QoS a fin de definir el comportamiento de un servicio portador EPS, se basa en cuatro parámetros fundamentales, añadiéndose dos asociados a la suscripción de un usuario. En la Figura 35 se puede ilustrar el conjunto de parámetros de QoS en la red LTE.

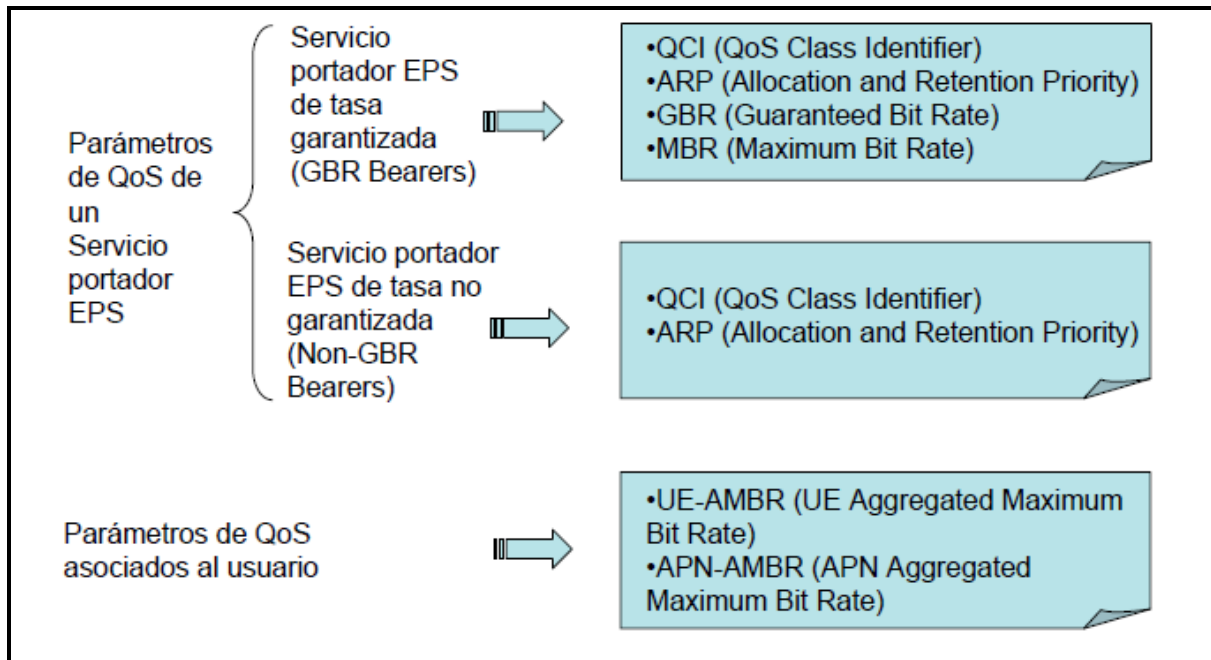


Figura 35: Conjunto de parámetros QoS en la red LTE [13]

Se debe señalar que un servicio portador *EPS* (*EPS Bearer Service*) es un servicio de transferencia de paquetes IP, asociados a éste parámetros de QoS.

Por cada servicio portador EPS, se cuenta mínimo con dos parámetros que son:

- QCI (QoS Class Identifier): Encargada del comportamiento del plano de usuario del servicio portador EPS. Se debe enfatizar que el valor de QCI no indica de forma directa ningún tipo de magnitud que involucre la prestación de servicios de la red, por lo contrario, es un puntero a un determinado servicio. Los QCI estandarizados se proporcionan en: prioridad, retardo de paquetes, tasa de pérdidas de paquetes.
- ARP (Allocation and Retention Priority): Aplica a la operativa de control. Es utilizado como indicador de prioridad en los procesos de: establecimiento, modificación y desactivación de un servicio un servicio portador. LTE soporta 15 prioridades, estas prioridades aplican cuando no haya suficientes recursos para dar respuesta a varias activaciones.

Varios servicios portadores conocidos como servicios de tasa garantizadas especifican el parámetro de tasa media garantizada - GBR y otro de tasa máxima permitida – MBR.

Adicionalmente, un usuario de LTE tiene asociados dos parámetros que indican la máxima tasa de transferencia en bits/s, éstos son:

- UE-AMBR: Acota la tasa máxima del equipo de usuario.
- APN-AMBR: Acota la tasa agregada máxima del equipo del usuario con una determinada red externa.

Se debe enfatizar que a través de estos parámetros la operadora de la red plantea diferentes estrategias de negocio a fin de establecer la tasa máxima de transferencia acordada o fijada con los usuarios.

2.3.1.1.3. Procedimiento de Gestión de Sesiones

En LTE la activación, modificación y desactivación de los servicios portadores EPS se lo realiza desde la red en base a los datos de subscripción del usuario o a su vez de las políticas de uso. Los procedimientos fundamentales de gestión de sesiones son:

- *Registro (Network Attach)*: LTE a través de este procedimiento establece el servicio de conectividad IP.
- *Petición de Servicio (Service Request)*: LTE admite que un determinado usuario sin conexión o modo idle, mantenga abiertos los servicios portadores EPS en la red troncal.
- *Petición de conexión PDN solicitada por el terminal (UE Request PDN Connectivity)*: LTE admite al equipo de usuario inicie establecer una conexión PDN extra al a conexión ya establecida con un determinado PDN.
- *Modificación del servicio portador solicitada por el terminal (UE request bearer resource modification)*: A través de este proceso un terminal solicita

cambios en los servicios portadores que ofrece la red, por ejemplo: en los parámetros de QoS.

2.3.1.2. Gestión de Movilidad

Los sistemas de comunicaciones móviles deben contar con mecanismos a fin de avisar a los usuarios la activación de servicios originados desde la red en el lugar donde se encontraren. Las notificaciones o avisos conocidos también como *paging* a los terminales se debe realizar de manera selectiva, es decir las estaciones bases lo emitirán siempre y cuando exista una probabilidad de encontrar al usuario. El sistema debe contar con mecanismos de seguimiento a fin de limitar la localización de los usuarios en una zona determinada, a esta funcionalidad se le conoce como gestión de la localización. Se sintetiza que, la gestión de movilidad involucra a la gestión de localización, así como también la gestión de handover, temas que serán analizados en los apartados siguientes.

2.3.1.2.1. Gestión de la localización

A fin de gestionar la información de localización, LTE define el concepto de Área de Seguimiento (Tracking Area - TA), quien agrupa a un conjunto de eNBs y son los encargados de proporcionar información de localización en la red troncal EPC de un determinado equipo de usuarios.

Un TA se identifica mediante un TAI (Tracking Area Identifier), difundándose mediante mensajes de información de sistema enviados en los canales de broadcast de los eNBs. El terminal móvil una vez que recibe el TAI se encarga de informar a la red indicando al TA que se encuentra asociado, para ello utiliza los mecanismos de Network Attach y de *Tracking Area Update*. Es así que, la red cuando requiera establecer comunicación con un determinado terminal, el mensaje de aviso *paging* se difunde a través del conjunto de eNBs que integra el TA que se encuentra localizado el terminal.

Se debe enfatizar que un eNB pertenece a un único TA de una red de troncal EPC, concluyendo que no existe solapación entre TA.

2.3.1.2.2. Mecanismo de handover

El mecanismo de handover consiste en la capacidad de ofrecer al usuario que se encuentra en movimiento conectado al sistema a una determinada base y resulte necesario cambiar de estación base, manteniendo la conexión activa.

En LTE, éste mecanismo se fundamenta en los siguientes principios:

- *Controlado por la red y asistido por el terminal:* El cambio de una estación base a otra, toma la decisión un eNB.
- Una vez se efectúa esta decisión, la red reserva los recursos necesarios en el eNB destino, garantizando la transferencia al nuevo eNB; y, ordena al terminal que realice el cambio. A este proceso se le conoce con el nombre de *Make Before Break*.
- La red cuenta con mecanismos a fin de transferir los paquetes pendientes en el eNB antiguo hacia el eNB destino, esto se lo realiza mediante la interfaz X2.

2.3.1.2.3. Procedimiento de Gestión de la Movilidad

En LTE, los procedimientos de gestión de la movilidad son:

- *Procedimiento de registro – Network Attach:* Consiste en el procedimiento combinado de: movilidad y de sesiones.
- *Procedimiento de actualización de áreas de seguimiento – Tracking Area Update:* Cuenta con variantes en función de si la actualización conlleva el cambio de las pasarelas MME y/o S-GW de la red troncal.
- *Procedimiento de Handover:* Se realiza mediante la interfaz X2.

2.3.1.3. Gestión de Seguridad

La gestión de la seguridad en los sistemas móviles es un tema relevante, toda vez que debe al ser el canal abierto entre el terminal y la infraestructura (canal radio) condicionan el desarrollo tanto de la arquitectura como de los mecanismos de seguridad. En los apartados subsiguientes se analizarán mecanismos de seguridad en LTE.

2.3.1.3.1. Marco General de Seguridad

Las principales categorías de servicios de seguridad en los sistemas de comunicaciones móviles se clasifican en:

- *Autenticación:* Este servicio se encarga de contrastar la identidad de los usuarios que se conectan al sistema, así como también, que tengan la certeza de conectarse a la red correcta.
- *Control de Acceso:* Este servicio se encarga de la prevención de acceso no autorizado a recursos.
- *Confidencialidad:* Este servicio se encarga de la protección de los datos que transporta el sistema frente a usuarios no autorizados. En LTE, se basa en limitar al máximo la transmisión de identificadores universales de usuario en la interfaz radio.
- *Integridad:* Este servicio se encarga de garantizar que los datos recibidos por una entidad no hayan sufrido alguna alteración desde que inicio la transmisión.
- *No repudio:* Este servicio se encarga de dejar constancia a fin de que el recipiente cuente con una prueba a fin de que el destinatario recibió dichos datos. Este tipo de servicio se basa principalmente en la firma electrónica.

Los dominios de la arquitectura de los mecanismos de seguridad que incorpora 3GPP que involucra LTE, se basa en la integración de todos los probables componentes en la provisión segura de los servicios de telecomunicación. En la Figura 36 se aprecia la arquitectura de seguridad.

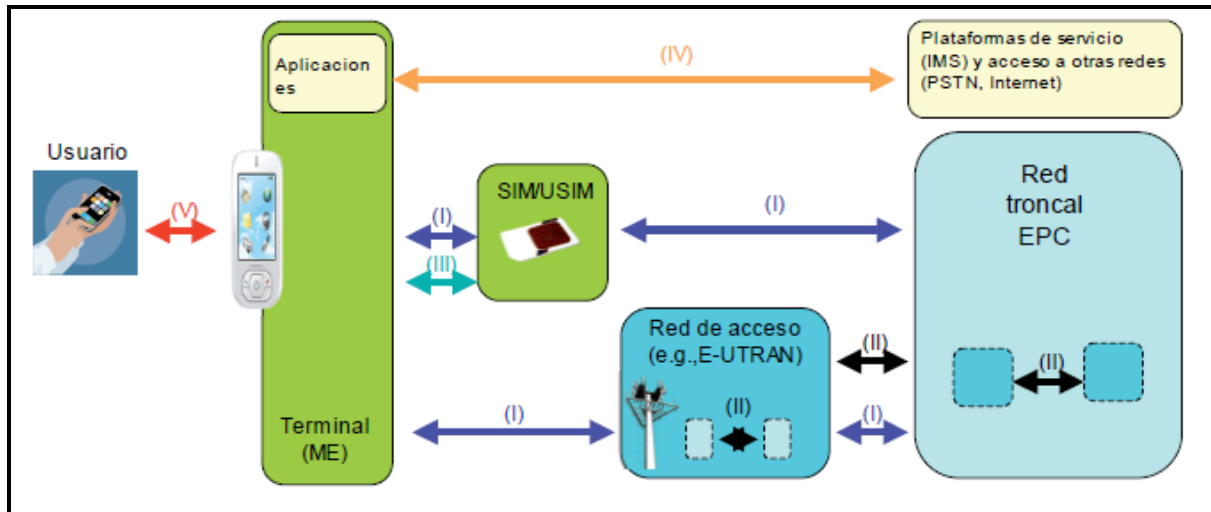


Figura 36: Dominios de la arquitectura de los mecanismos de seguridad 3GPP [13]

Los dominios de la arquitectura son:

- *Seguridad de Acceso a la Red:* Este dominio proporciona a los usuarios un acceso seguro a LTE, que incluye procesos de autenticación mutua entre el usuario y la red; confidencialidad e integridad.
- *Seguridad en el dominio de Red:* Este dominio se encarga de dar soporte de seguridad de todos los equipos que contemplan la infraestructura de la red, por ejemplo: interfaces entre eNBs y equipos de la red troncal o a su vez equipos entre distintas operadoras.
- *Seguridad del equipo de usuario:* Este dominio se encarga de establecer una operación segura entre el terminal LTE, la tarjeta USIM o SIM; y, el propio usuario del sistema.
- *Seguridad en nivel de aplicación y servicios:* Este dominio se encarga de brindar seguridad hacia las aplicaciones y servicios que son utilizadas por los usuarios a través de la red LTE. Como ejemplos de este servicio se puede

citar: confidencialidad de la señalización SIP, protocolos de transporte seguros para el intercambio de información – *Transport Layer Security* entre otros.

- *Visibilidad y configuración de la seguridad:* Este dominio se encarga de brindar al usuario un panorama amplio de la disponibilidad en la red de los servicios de seguridad. Como ejemplo de este servicio se puede citar: indicadores de gráfico en el equipo de usuario, que para el usuario representaría un candado.

2.3.1.3.2. Procedimiento de gestión de seguridad

Los fundamentales procedimientos de gestión de seguridad son los siguientes:

- *Activación del modo seguro para la señalización NAS:* Este procedimiento es utilizado por la entidad MME, controlando la activación y el modo de operación de los servicios de confidencialidad e integridad.
- *Comprobación de identidad del terminal:* Este procedimiento permite conocer la identidad – IMEI del equipo del usuario por parte de la entidad MME. Aplicado comúnmente en la identificación de equipos robados.
- *Activación del modo seguro en la red de acceso E-UTRAN:* Este procedimiento permite a la entidad MME indicar a un eNB que proceda a activar los servicios de confidencialidad e integridad.

2.4. TECNOLOGÍAS DE NIVEL FÍSICO ^{[13], [21]-[24]}

En este capítulo se analizarán los fundamentos de las tecnologías del nivel físico utilizadas en el sistema LTE, y como estas tecnologías permiten conseguir mayores niveles de capacidad y eficiencia en el uso de los recursos radio. Así mismo, se analizarán las siguientes técnicas:

- Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA): Empleada para enlaces descendentes.
- Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA): Empleada para enlaces ascendentes.
- Multiple Input Multiple Output (MIMO): En un sistema inalámbrico al realizar la transmisión, las señales pueden tomar diferentes trayectos debido a elementos que se pueden presentar en el medio, tales como: edificios, árboles, montañas, capas de la atmósfera, fenómenos climáticos entre otros.

Previo al estudio y análisis de la técnica OFDMA, es necesario concebir el origen de esta técnica siendo esta la técnica OFDM.

2.4.1. Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

OFDM es una técnica de comunicaciones que divide un canal en un número determinado de bandas de frecuencia equiespaciadas, en cada banda se transmite una subportadora que a su vez transporta una porción de la información del usuario.

El concepto fundamental de las señales OFDM es la ortogonalidad de las portadoras, ya que permite transmitir simultáneamente en un estrecho rango de frecuencias y sin que se produzcan interferencias entre ellas, en la Figura 37 se puede apreciar a 6 subportadoras OFDM.

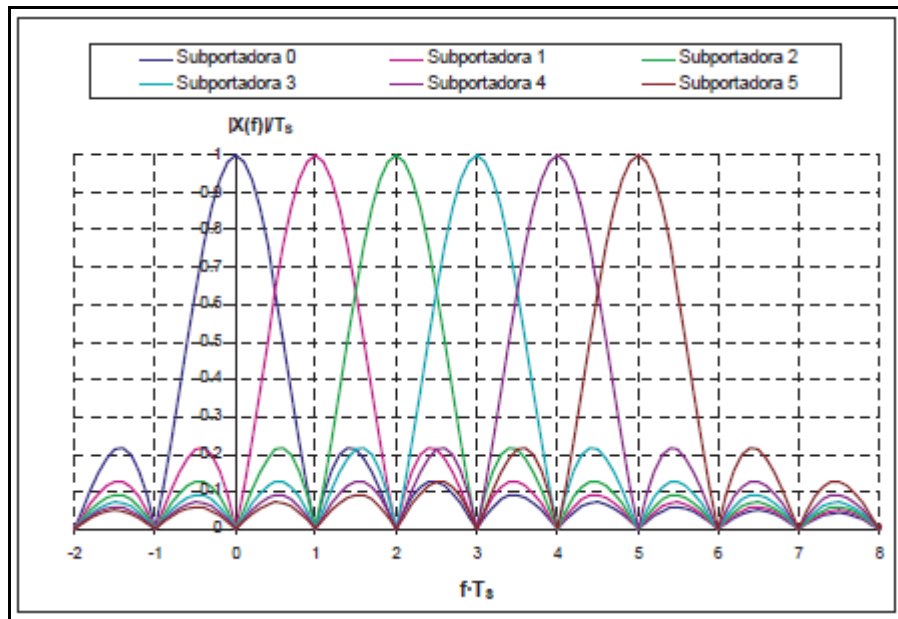


Figura 37: Espectro que contiene a 6 portadoras de OFDM [13]

El parámetro fundamental de la portadora OFDM es el tiempo de duración del símbolo, siendo este el siguiente:

$$T_s = \frac{1}{\Delta f}$$

Donde:

- El tiempo de duración del símbolo es T_s .
- La frecuencia de separación entre dos subportadoras es Δf .

En base a este análisis y tomando como ejemplo el expuesto mediante la Figura 37, se concluye que:

- Las subportadoras moduladas no se traslapan entre sí.
- Entre las subportadoras existen una separación de Δf .

Se debe considerar que la característica de la ortogonalidad está determinada mediante la relación entre el alejamiento entre las Δf y la duración T_s del mismo.

OFDM es utilizado en comunicaciones digitales de banda ancha como en medios inalámbricos tales como: guías ópticas o metálicas, en aplicaciones de tipo: televisión y radio digital, comunicaciones móviles, difusión de audio y acceso de

banda ancha y es considerado la plataforma para las comunicaciones OFDMA utilizada por el sistema LTE.

2.4.1.1. Prefijo cíclico

En los medios inalámbricos al efectuarse la transmisión de señales, es propenso a fenómenos tales como: propagación multicamino, difracción, reflexión entre otros; dichos fenómenos producen que la señal transmitida sea recibida en diferentes tiempos, amplitudes y fases. Este tipo de retardos se puede corregir aplicando un prefijo cíclico que consiste en agregar la última parte de la señal al inicio de la señal OFDM, como se muestra en la Figura 38:

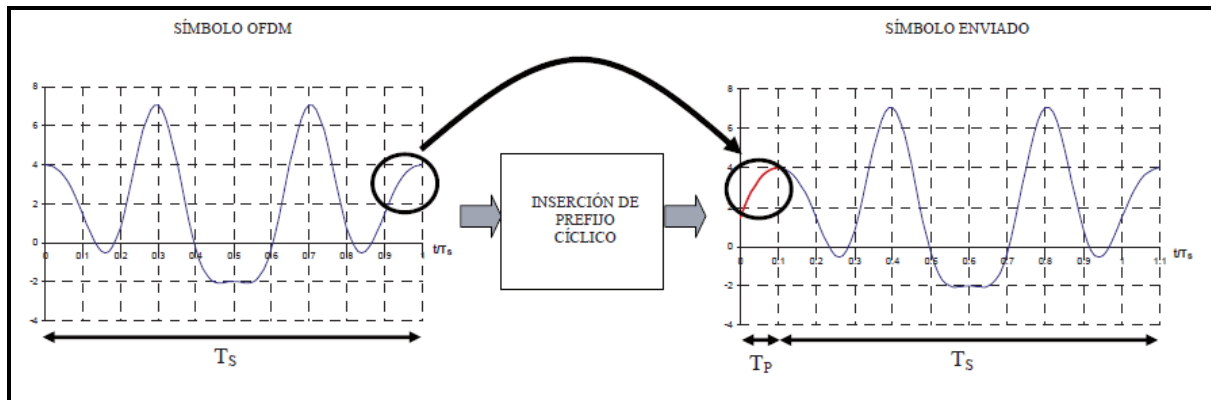


Figura 38: Inserción del prefijo cíclico [13]

2.4.1.2. Modulación / Demodulación OFDM

En la Figura 39 se muestra el proceso de modulación y demodulación del sistema OFDM:

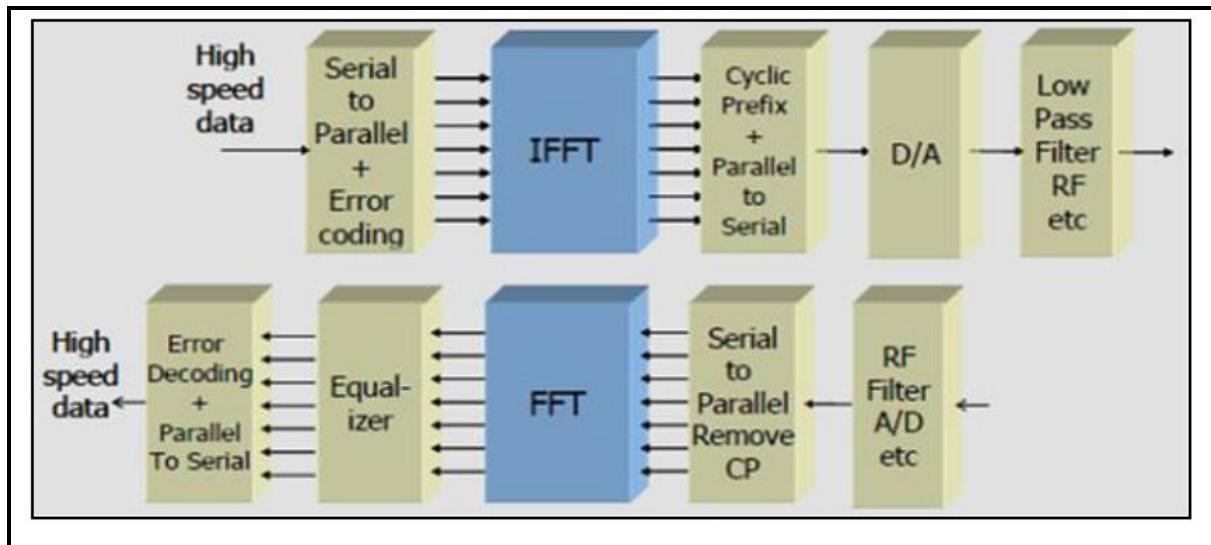


Figura 39: Modulación y Demodulación en OFDM [13]

A continuación, se procederá a realizar el análisis del proceso que sigue la información:

- Los bits a transmitir son introducidos en el sistema en serie.
- Encontramos el primer bloque serie-paralelo, quien agrupará los bits a fin de codificarlos (habitualmente mediante el modulador QAM) y enviará un grupo de símbolos al siguiente bloque (IFFT).
- Inverse Fast Fourier Transform –IFFT: Realiza la inversa de la transformada discreta de Fourier. Algunas entradas del bloque IFFT pueden dejarse a cero (0) a fin de facilitar el filtrado de los alias.
- Se añade el prefijo cíclico.
- Se vuelve a enviar los datos en serie a fin de realizar la conversión digital-analógica.
- Posteriormente se pasa por el filtro paso bajo, encargado de recuperar la réplica de la señal en banda base, y se envía la información a la etapa RF.

Cuando ingresa la señal en el receptor y ha pasado previamente por la etapa RF, se procede a realizar el proceso inverso a los detallados previamente, es decir:

- Se pasa de un flujo de datos serie a uno paralelo.
- Se retira el prefijo cíclico.
- Se aplica la FFT.

- Se ecualiza y se procede a la demodulación de los símbolos QAM para obtener finalmente los bits originales.

2.4.2. Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)

OFDMA es una técnica de comunicaciones sustentada en OFDM. En OFDMA sus subportadoras pueden ser asignados a varios usuarios aleatoriamente. A mayor asignación de estas subportadoras se mejora: la velocidad de transmisión, calidad de servicio entre otros. Una de las fortalezas de OFDM es que permite el envío de datos simultáneos siendo los usuarios distintos en subportadoras distintas, una representación de lo manifestado se puede apreciar en la Figura 40:

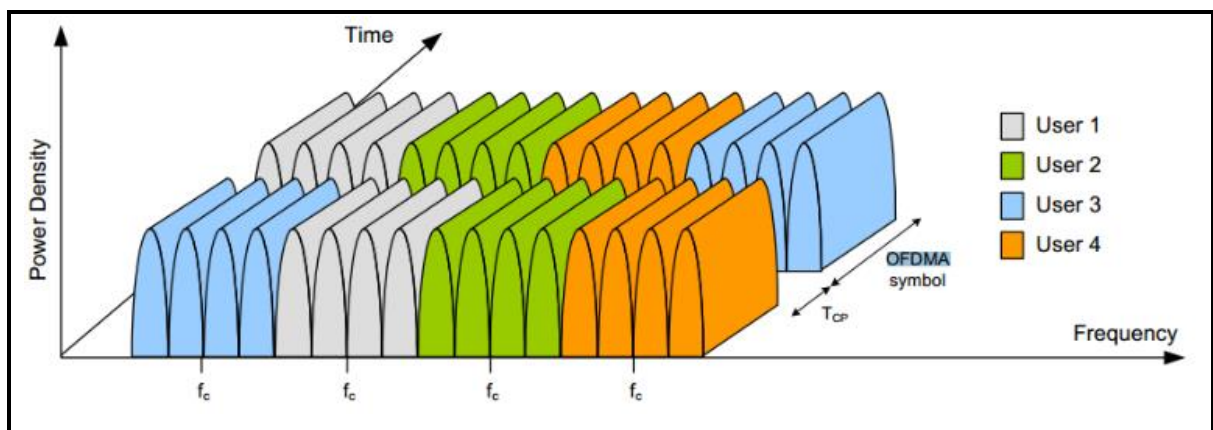


Figura 40: Representación de asignación de recursos a varios usuarios a través de OFDMA [14]

Si bien es cierto tanto OFDM como OFDMA son técnicas de comunicación que se basan en la transmisión multiportadora, no obstante, la principal característica que nos permite distinguir una de la otra es la siguiente:

- OFDM: En un intervalo de tiempo los símbolos de datos del usuario son transportados bajo subportadoras predeterminadas para el usuario mencionado.
- OFDMA: Asignación de las mejores subportadoras a los distintos símbolos de datos de los diferentes usuarios dependiendo de la calidad de transmisión.

Una representación gráfica de estas dos técnicas de comunicación, se puede apreciar en la Figura 41:

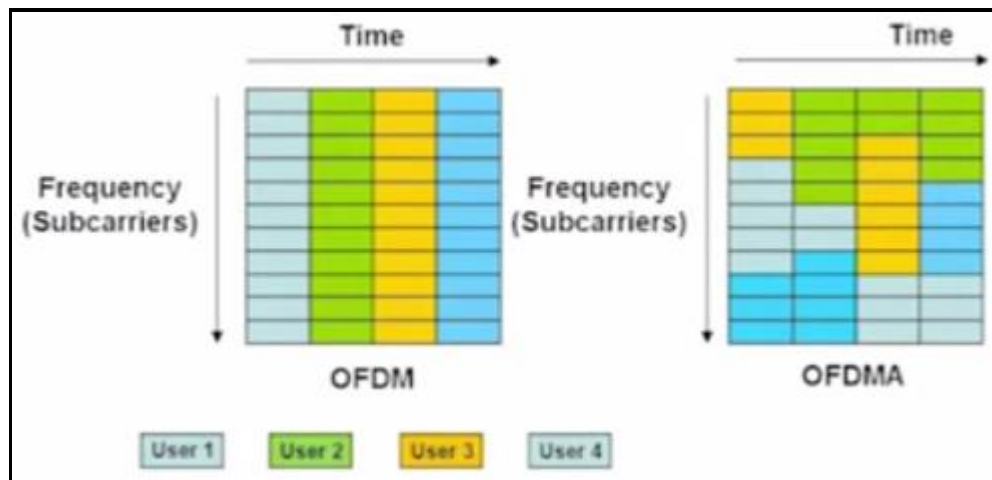


Figura 41: OFDM vs OFDMA [14]

Entre las ventajas principales de la técnica de comunicación de OFDMA, destacan las siguientes:

- Dependiendo de la cantidad de asignación de subportadoras por usuario, permite gestionar la velocidad de transmisión en función de los servicios con los que dispone.
- La asignación de subportadoras a los usuarios se lo realiza dinámicamente, tomando en cuenta las siguientes consideraciones:
 - Obedecerá de la relación existente entre la señal y el ruido que presente el canal radio.
 -
 - Para la asignación deberá cumplir el procedimiento llamado *scheduling* en el dominio de frecuencia.
- Ofrece mayor ancho de banda y alta velocidad de transmisión de datos.
- Transmisión de datos robusta con mejor eficiencia espectral.

2.4.3. Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA)

SC-FDMA es una técnica de comunicaciones caracterizado por las altas velocidades de transmisión en enlace ascendente acogido por 3GPP en los sistemas 4G. El proceso de modulación se lo realiza mediante OFDM, proceso en el cual mediante la transformada discreta de Fourier – *Discrete Fourier Transform (DFT)*, cada símbolo es transformado al dominio de frecuencia previo a ingresar al bloque de transmisión *OFDM*, como se puede apreciar en la Figura 42:

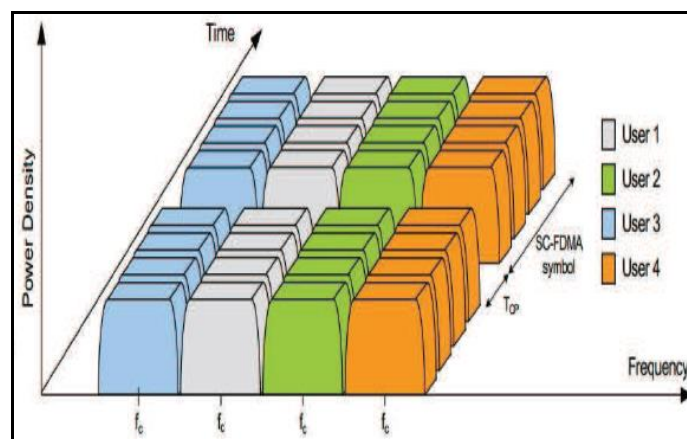


Figura 42: Subportadoras en el enlace ascendente son moduladas con el mismo símbolo [14]

2.4.4. OFDMA vs SC-FDMA

En la Figura 43 se puede apreciar la representación gráfica que permitirá realizar el análisis de la comparación entre OFDMA y SC-FDMA.

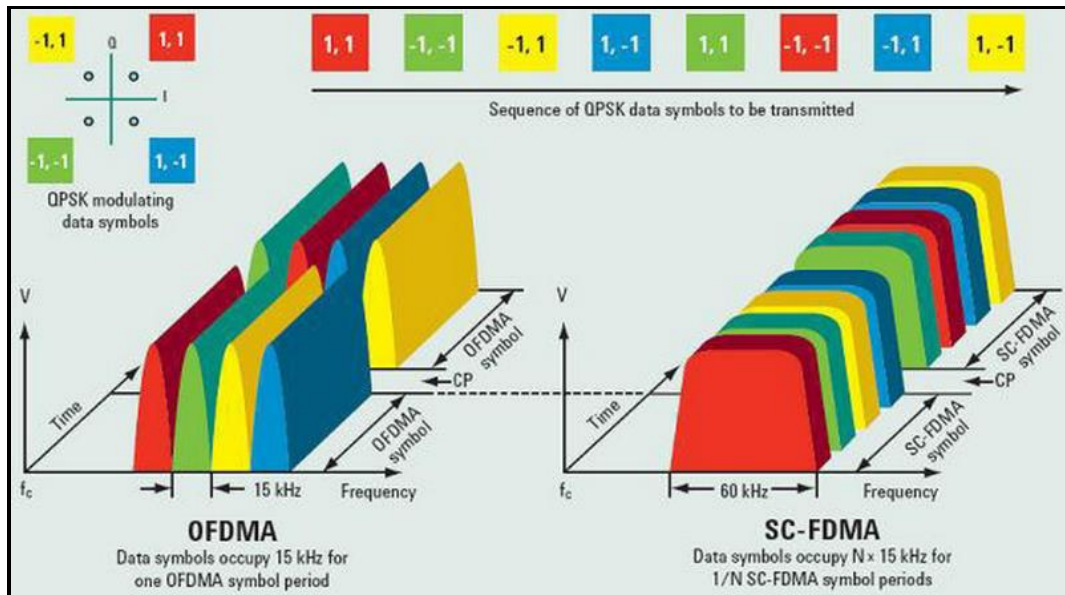


Figura 43: OFDMA vs SC-FDMA [22]

En la gráfica de OFDMA (parte izquierda), se puede visualizar que:

- Se cuenta con cuatro (4) subportadoras cada una con 15KHz de un total de 60 KHz del ancho de banda.
- Se concluye que únicamente la fase de cada subportadora es modulada.
- Así mismo, se mantiene constante las potencias de las subportadoras entre los diferentes símbolos.
- Finalizado el periodo de símbolo OFDMA, se inserta el prefijo cíclico (CP).
- Se enfatiza que, para crear la señal a ser transmitida es necesario contar con el proceso IFFT sobre cada portadora, de esta manera se crea las señales en el dominio del tiempo.

El proceso en SC-FDMA es idéntico a OFDMA, lo único que le diferencia es que para la reproducción de la señal inicia bajo un procedimiento de pre codificación, a fin de continuar con el proceso idéntico de OFDMA.

La principal diferencia entre estas técnicas de comunicación es que:

- OFDM: En paralelo se transmiten 4 símbolos QPSK, uno por subportadora.

- SC-FDMA: A diferencia de OFDM, cuádruplicando su velocidad en serie se transmiten 4 símbolos QPSK, conllevando a que, por cada símbolo se ocupe mayor ancho de banda.

2.4.5. Multiple Input Multiple Output (MIMO)

En un sistema inalámbrico al realizar la transmisión, las señales pueden tomar diferentes trayectos debido a elementos que se pueden presentar en el medio, tales como: edificios, árboles, montañas, capas de la atmósfera, fenómenos climáticos entre otros. Estas señales se dividen lo que conlleva a que puedan tomar rumbos diferentes para llegar al receptor, provocando que éstas lleguen atenuadas, desfasadas, aumente la cantidad de errores entre otros.

A fin de superar estos inconvenientes en el sistema inalámbrico, se creó la técnica sustentada en múltiples antenas aprovechando el fenómeno de propagación multitrayecto.

A esta técnica se lo denomina como Multiple Input Multiple Output – MIMO, que se caracteriza por contar con varias antenas tanto para el proceso de transmisión como de recepción, utilizando la propagación de multitrayecto del canal inalámbrico.

2.4.5.1. Definición de MIMO

Múltiple entrada múltiple salida, por sus siglas en inglés conocida como MIMO, se refiere concretamente a la manera como las ondas de transmisión y recepción son manejadas en antenas para dispositivos inalámbricos. A fin de incrementar la eficiencia espectral, es decir: aumentar la tasa de transmisión y reducir la tasa de error, MIMO aprovecha fenómenos físicos tales como la propagación multicamino.

2.4.5.2. Diversidad espacial

La diversidad espacial consiste en utilizar caminos de propagación distintos a fin de transmitir la señal; en otras palabras, utilizar una o varias antenas transmisoras y una o varias antenas receptoras, tal como se muestra en la Figura 44:

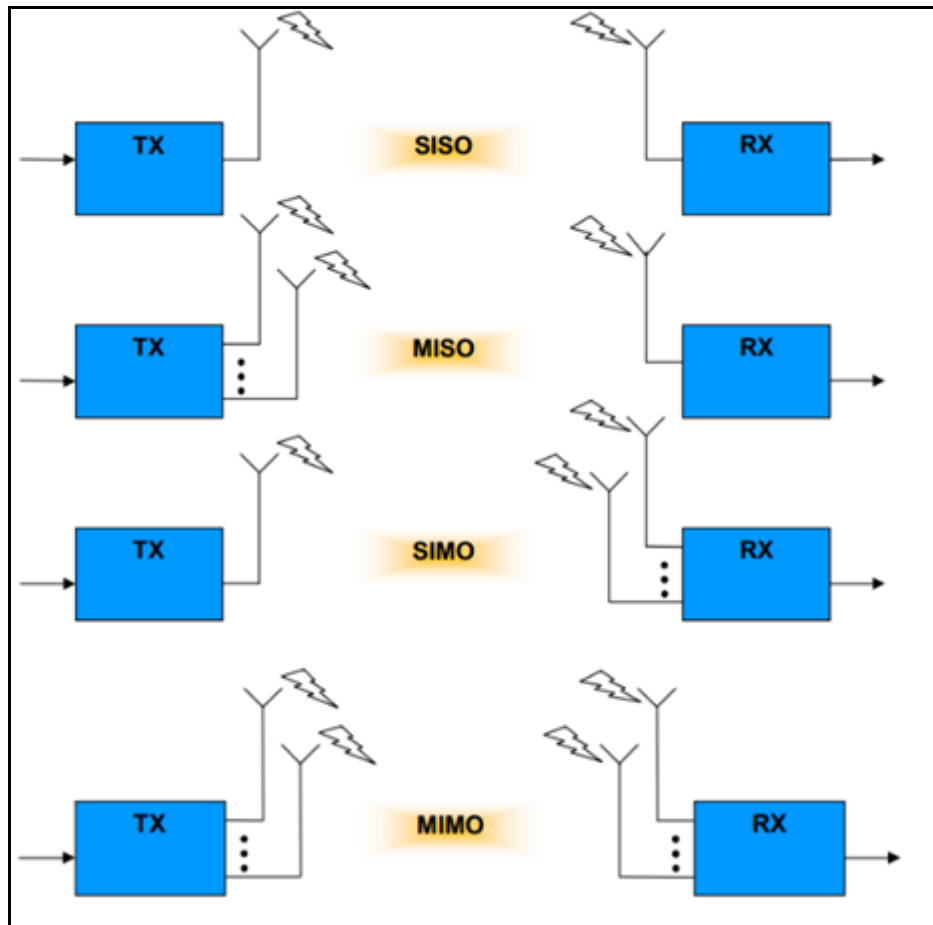


Figura 44: Diversidad espacial SISO, MISO, SIMO y MIMO [24]

Previo a analizar detalladamente a la tecnología MIMO, se va a mencionar las tecnologías mostradas en la Figura 44.

- SISO (Single Input, Single Output): Tecnología que utiliza una antena transmisora y una antena receptora.
- MISO (Multiple Input, Single Output): Tecnología que utiliza varias antenas transmisoras y una antena receptora, denominada también como diversidad en transmisión.
- SIMO (Single Input, Multiple Output): Tecnología que utiliza una antena transmisora y varias antenas receptoras, denominada también como diversidad en recepción.

- MIMO (Multiple Input, Multiple Output): Tecnología que hace uso de varias antenas transmisoras y varias antenas receptoras, es decir existe diversidad en transmisión y recepción.

2.4.5.3. Técnicas de transmisión de MIMO

Éstas técnicas están basadas en: diversidad de antenas, multiplexación espacial y beamforming; mismas que se analizarán a continuación:

2.4.5.3.1. Diversidad de antenas

Como se explicó anteriormente, a través del uso de una o varias antenas tanto en el transmisor como en el receptor los sistemas MIMO usan la diversidad espacial.

- **Diversidad en recepción:** Dos o más antenas son utilizadas por un mismo receptor a fin de generar recepciones independientes de la señal transmitida. Estas antenas deben estar separadas adecuadamente; es decir, distribuidas estratégicamente en el espacio. La diversidad en recepción se divide en los siguientes tipos:
 - *Diversidad por selección:* Se elige una de las antenas tomando en cuenta un criterio concreto, puede ser: la señal con mejor SNR, la señal con mayor potencia, entre otros. En la Figura 45 se puede apreciar el esquema de un receptor con diversidad por selección:

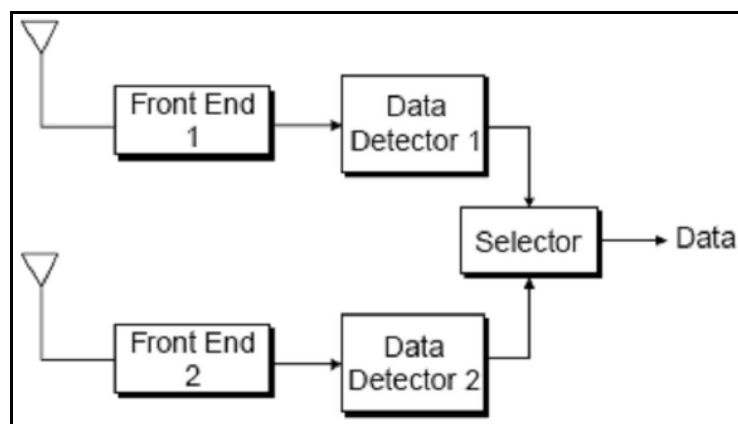


Figura 45: Esquema de un receptor con diversidad por selección [24]

- **Diversidad por conmutación:** Cuando la señal recibida no supera un cierto umbral cambia la antena de recepción. En la Figura 46 se puede apreciar el esquema de un receptor con diversidad por conmutación:

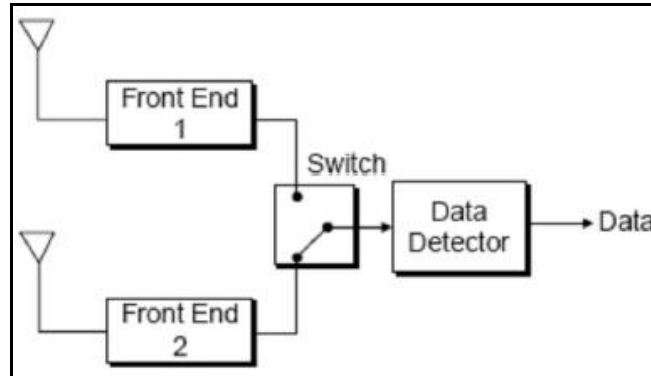


Figura 46: Esquema de un receptor con diversidad por conmutación [24]

- **Diversidad por combinación:** Se procede a realizar una combinación lineal ponderada de todas las señales recibidas; combinaciones pueden ser: de igual ganancia, de radio máximo, entre otros. En la Figura 47 se puede apreciar el esquema de un receptor con diversidad por combinación:

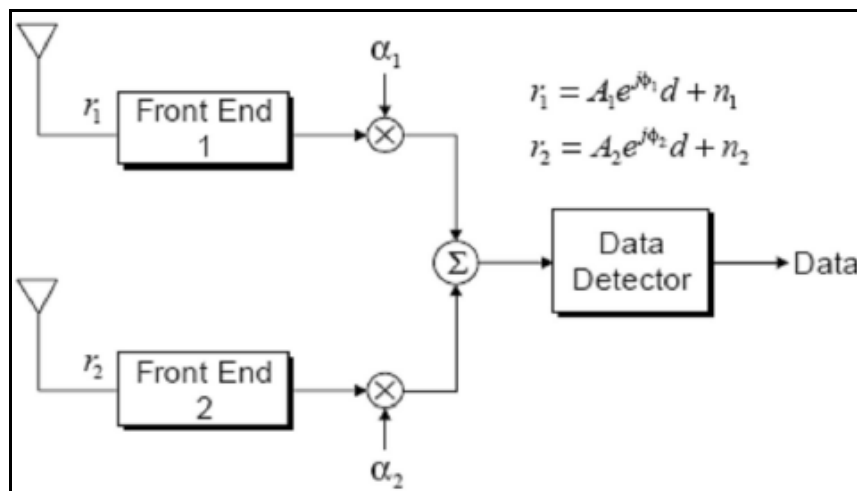


Figura 47: Esquema de un receptor con diversidad por combinación [24]

- **Diversidad en transmisión:** Dos o más antenas son utilizadas por un mismo transmisor. La diversidad de transmisión puede ser: con cambio de antena, con ponderado de frecuencia, a través de diversidad de retraso y a

través de diversidad de código. En el siguiente apartado se analizará dicho código por ser el que más habitualmente utiliza MIMO.

- *Diversidad de código o técnicas Space-Time Coding (STC)*: Método encargado de mejorar la fiabilidad de la transmisión de datos. A través de la transmisión redundante de copias codificadas de la trama de datos, se espera que al menos una alcance en buen estado al receptor y sea fiable su decodificación. STC se divide en:
 - *Space - Time Trelling Coding (STTC)*: La transmisión redundante de copias son codificadas mediante código Trellis. A través de este método se obtiene la ganancia de: diversidad y codificación.
 - *Space – Time Block Coding (STBC)*: La transmisión redundante de copias son codificadas en conjunto como un bloque de datos. A través de este método solo se obtiene la ganancia de diversidad.

2.4.5.3.2. Multiplexación espacial o Spatial Multiplexing (SM)

La multiplexación espacial radica en combinar diferentes señales con anchos de banda menores, en una única señal con mayor ancho de banda; a diferencia del proceso de demultiplexación que es lo contrario al proceso de multiplexación; es decir, radica en dividir la señal de mayor ancho de banda en varias señales iguales de menor ancho de banda. Se debe destacar que el orden de multiplexación espacial es igual a la cantidad de flujos de datos a ser transmitidos en paralelo; y, el valor máximo será limitado por el número menor de antenas: transmisoras o receptoras. En la Figura 48 se puede apreciar la multiplexación espacial.

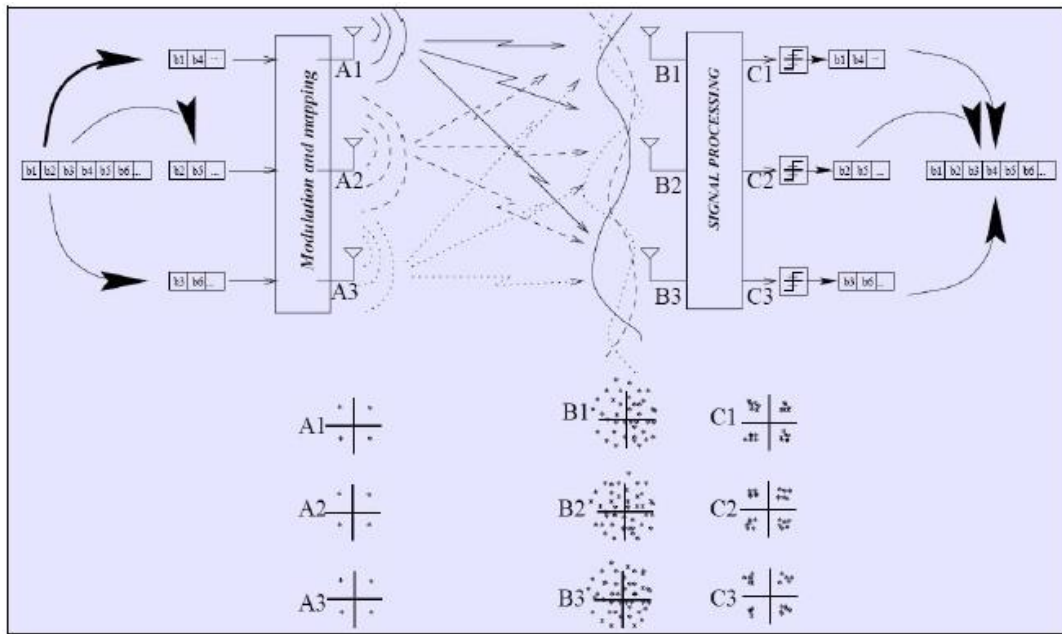


Figura 48: Multiplexación espacial [24]

2.4.5.3.3. Beamforming

Es la técnica de procesamiento espacial de señales que realiza el transmisor MIMO, a fin de controlar el patrón de radiación de la antena. Cumple la funcionalidad de un filtro, y es aplicada tanto en el transmisor como en el receptor.

- *Transmisor:* Beamforming es utilizado para configurar el patrón de radiación de la antena. Cambiando la forma del haz, es posible aumentar la directividad de la antena en una determinada dirección.
- *Receptor:* Beamforming es utilizado a fin de incrementar la sensibilidad del receptor o a su vez disminuir; en una dirección específica.

2.4.5.4. Funcionamiento de MIMO

La característica principal de MIMO es aprovechar la propagación multitrayectoria o multicamino. Es así que, este sistema contará con un transmisor de N_T antenas transmisoras, estratégicamente distribuidas en el espacio y un procesador digital de señales – Digital Signal Processor (DSP); el DSP será el encargado de codificar el flujo de datos de un solo usuario con velocidad R , en N_T “subflujos” de velocidad

R / N_T cada uno. Se enfatiza que cada subflujo es enviado bajo los mismos tiempos y frecuencias a través de diferentes antenas.

Como se explicó anteriormente, debido a la variedad de percances que pueden presentar al ser un medio inalámbrico, la señal transmitida tomará diferentes rutas o a su vez puede existir que dichas señales se mezclen, de tal manera que en el lado del receptor el trabajo del DSP será la separación, ordenación y combinación de estas señales mediante algoritmos sofisticados; de esta manera se consigue la señal original transmitida.

2.4.5.5. MIMO en LTE

La tecnología MIMO es aplicada para mejorar la comunicación en medios inalámbricos, es así que una de las áreas de aplicación es las comunicaciones móviles 4G de LTE. La aplicación de la tecnología MIMO en LTE permitirá satisfacer necesidades tales como: alta fiabilidad, alta tasa de datos y gran alcance.

2.4.5.5.1. Terminología para múltiples antenas en LTE

- Codeword (CW): Representa los datos del usuario antes de que éstos sean formateados para su transmisión. Una o dos palabras código (CW0 y CW1) se pueden utilizar dependiendo de las condiciones del canal y el caso de uso.
- Layer stream: Para MIMO 2 layers mínimo son comprometidas a ser utilizadas, mientras que 4 layers son comprometidas para LTE. Se debe mencionar que la cantidad de layers es igual o inferior a la cantidad de antenas.
- Precoding: Modifica las señales antes de su transmisión; a través de: diversidad, multiplexación espacial o dirección de haz.

2.4.5.5.2. *SU-MIMO y MU-MIMO en el enlace de bajada de LTE*

Single-User MIMO es la tecnología de un solo usuario o denominado también punto a punto MIMO, siendo esta la que se ha analizado anteriormente (sencillamente MIMO). Si bien es cierto SU-MIMO mejora la eficiencia espectral, la capacidad del canal entre otros, no obstante, no es posible aprovechar al máximo la diversidad de usuarios, en otras palabras, no es posible trabajar con varios usuarios al mismo tiempo como sí se lo puede realizar mediante la tecnología MU-MIMO.

En LTE, SU-MIMO envía dos CWs a un único equipo de usuario, a diferencia de MU-MIMO, por cada CW se envía a un equipo de usuario únicamente.

2.4.5.5.3. *SU-MIMO y MU-MIMO en el enlace de subida de LTE*

SU-MIMO UL en LTE no es prioritario, toda vez que para su implementación requieren de dos transmisores involucrando más costos, consumo de batería entre otros.

A diferencia de SU-MIMO, MU-MIMO es viable su implementación, para ello se requiere de dos transmisores pertenecientes a diferentes usuarios. Así mismo, MU-MIMO transmite simultáneamente palabras código (CW) de diferentes equipos de usuario en el mismo instante y frecuencia en varias capas.

2.5. **INTERFAZ RADIO DEL SISTEMA LTE** ^{[13], [21], [26]-[27]}

Esta interfaz permite la conexión entre el equipo de usuario y las entidades estaciones base eNB, a fin de enviar tráfico y señalización. Si bien es cierto, como parte de la arquitectura de LTE se analizó la interfaz radio, no obstante en este apartado se realizará un análisis minucioso, para ello es importante visualizar mediante la Figura 49 el esquema de la interfaz de radio de LTE.

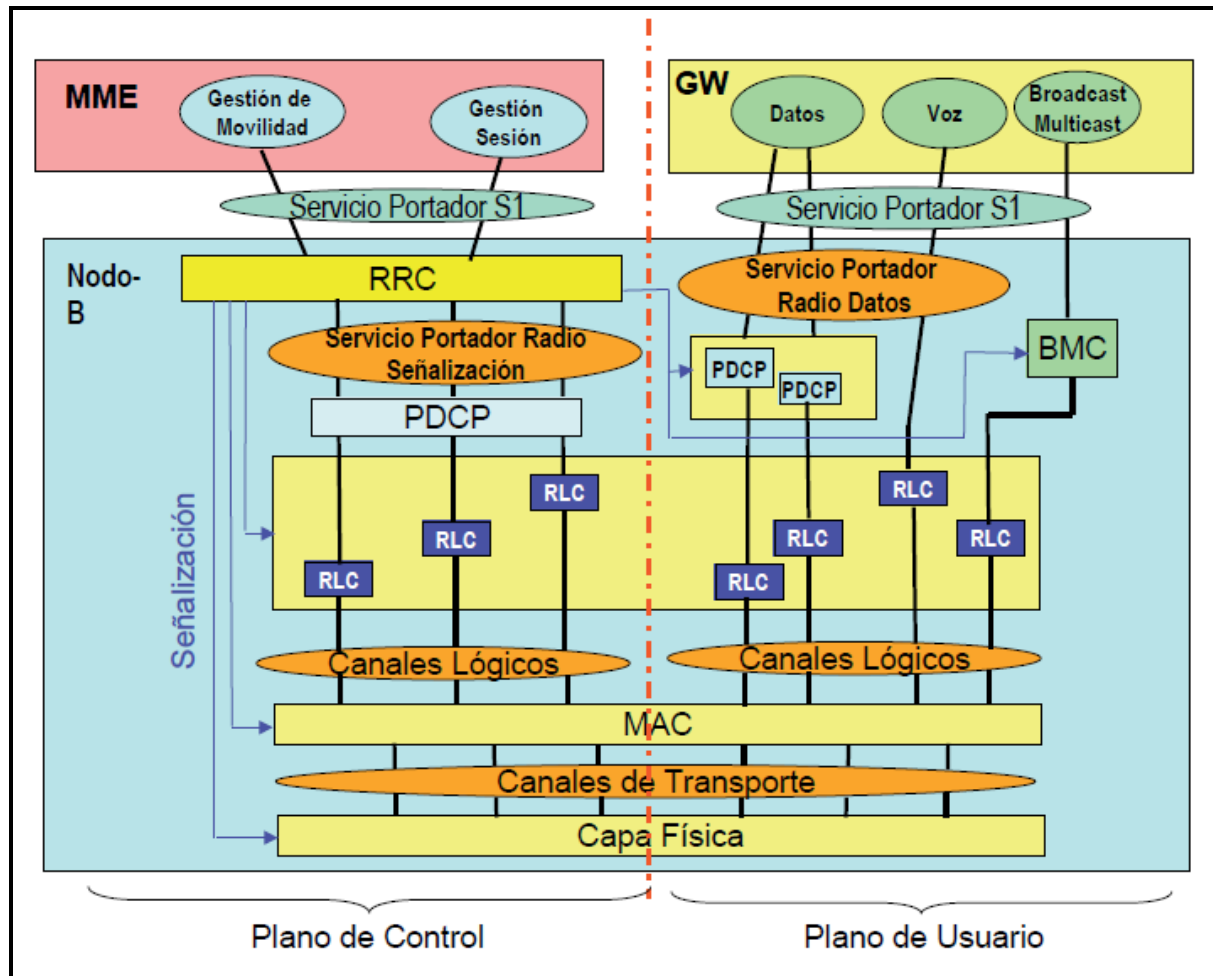


Figura 49: Interfaz Radio de LTE [13]

De la representación del esquema de la interfaz radio de LTE, surgen las siguientes observaciones:

- La torre de protocolos de esta interfaz está formada por los planos de: control y usuario.
- Plano de control: Cuya función principal es la trasportación de mensajes de control que se intercambian entre el equipo de usuario y la red, éste se conecta con la entidad MME.
- Plano de usuario: Es el encargado del envío de la información. Su conexión hacia GW es mediante los servicios portadores S1a fin de transferir los

paquetes de usuario (mensajes de: broadcast, multicast y voz; y datos) entre eNB y la red troncal.

- El conjunto de protocolos se encuentra en la entidad eNB, a fin de establecer comunicación entre el terminal y las eNB. Se debe enfatizar que el conjunto de protocolos utilizados en el plano de control son los mismos usados en las capas de: enlace y física; agregando únicamente el protocolo RRC. El análisis de estos protocolos se los realizará en el siguiente apartado.
- El conjunto de protocolos mantiene una comunicación mediante los siguientes canales:
 - Canales lógicos: Encargados de establecer comunicación entre los protocolos de las capas: MAC y RLC. Su función principal es analizar la información transmitida por la interfaz radio, si ésta corresponde a control o datos.
 - Canales de transporte: Encargados de mantener comunicación entre las capas: física y MAC. Su función principal es multiplexar canales lógicos en un canal de transporte.
 - Canales físicos: Estos canales establecen estrategias de transmitir y recibir información tanto de control como de datos.

2.5.1. Pila de protocolos, canales lógicos y canales de transporte

2.5.1.1. Pila de Protocolos

2.5.1.1.1. Broadcast / Multicast Control Protocol (BMC)

La gestión de transmitir mensajes multicast o broadcast es responsabilidad de este protocolo.

2.5.1.1.2. Radio Resource Control (RRC)

Protocolo encargado de gestionar la conexión entre eNB y el terminal; también es responsable de establecer, liberar y actualizar los servicios portadores de radio. Las funciones que destacan de este protocolo son:

- Radiodifusión (broadcast) de la información creada por el sistema de información.
- Implementación de estrategias en ámbitos como: cifrado, seguridad e integridad.
- Procesos que involucran establecer, mantener y cerrar conexiones.

2.5.1.1.3. Packet Data Convergence Protocol (PDCP)

Las funciones que destacan en este protocolo son:

- Comprimir / descomprimir cabeceras de paquetes IP que alcanzan a la entidad eNB.
- Entrega / recepción ordenada de los paquetes.
- Detección de paquetes duplicados RLC.
- Cifrado de datos de información y de control.

2.5.1.2. Radio Link Control (RLC)

La capa RLC es la encargada de la implementación de mecanismos tales como: evitar las duplicidades de paquetes y retransmisión de paquetes recibidos erróneamente; y, segmentar y concatenar paquetes IP tomados de capas

superiores a fin de acoplar el tamaño conforme la capacidad de transmisión de la interfaz.

Estos procedimientos son implementados a fin fija enlaces fiables de información mediante la interfaz aire.

2.5.1.3. Medium Access Control (MAC)

La capa MAC es la responsable principalmente de:

- Permitir el acceso ordenado de los terminales móviles al espectro radioeléctrico.
- Corregir errores a través de los procedimientos de retransmisión como son: Hybrid ARQ o HARQ.
- Establecer preferencias entre canales lógicos, aplicando la técnica dinámica de calendarización (Dynamic Scheduling).
- Establecer formatos de transmisión a ser utilizada por parte de la capa física.
- Notificar la gestión de los recursos, para ello LTE lo realiza mediante las gestiones: dinámica y semi estática.
 - Gestión dinámica: Mediante el enlace descendente se envía mensajes de los recursos asignados, mientras que a través del enlace ascendente se ratifica los recursos asignados.
 - Gestión semi estática: Procedimiento similar a la gestión dinámica, diferenciando únicamente en que la asignación de recursos se lo hace en base a un tiempo determinado.

2.5.1.4. Canales Lógicos

Los canales lógicos son: de tráfico y de control. A continuación, se procederá a describirlos respectivamente.

2.5.1.4.1. De tráfico

- *Canal de tráfico dedicado – Dedicated Traffic Channel (DTCH):* Canal dedicado a fin de transferir información entre la entidad eNB y un terminal, en los enlaces: ascendente y descendente.
- *Canal de tráfico de difusión de grupo – Multicast Traffic Channel (MTCH):* Es un canal utilizado para transmitir información desde la entidad eNB a un conjunto de usuarios; existiendo únicamente en el enlace descendente.

2.5.1.4.2. De control

- *Canal de control de difusión - Broadcast Control Channel (BCCH):* Canal utilizado por la entidad eNB a fin de transmitir información a los terminales, como: información de acceso a la red, parametrizaciones de los canales de control, identificación del: operador y de la celda; entre otros. Canal que existe únicamente en el enlace descendente.
- *Canal de control de verificación - Paging Control Channel (PCCH):* Canal utilizado por la entidad eNB a fin establecer comunicación con los terminales de los cuales sabe su localización en una determinada área, pero no la celda o la entidad eNB en los que están localizados. Canal que existe únicamente en el enlace descendente.
- *Canal de control común - Common Control Channel (CCCH):* Canal utilizado para establecer comunicación entre el terminal y la entidad eNB y cuando no se ha logrado establecer la conexión en RCC. Canal que existe en los enlaces: ascendente y descendente.

- *Canal de control dedicado - Dedicated Control Channel (DCCH)*: Canal encargado de la transferencia de información de control entre la entidad eNB y el terminal, previo la conexión establecida en RCC. Canal que existe en los enlaces: ascendente y descendente.
- *Canal de control de difusión en grupo - Multicast Control Channel (MCCH)*: Canal encargado de transmitir información de control desde la entidad eNB hacia un grupo de usuarios. Canal que existe únicamente en el enlace descendente.

2.5.1.5. Canales de Transporte

Estos canales se especifican en enlaces: descendente y ascendente. A continuación, se procederá a describirlos respectivamente.

2.5.1.5.1. Enlace descendente

- *Canal de difusión - Broadcast Channel (BCH)*: Canal está asociado al canal lógico BCCH, y se transmite en toda la cobertura de la entidad eNB.
- *Canal compartido para el enlace descendente - Downlink Shared Channel (DL-SCH)*: Canal encargado de transportar información de: señalización y usuario. Su planificación es en tiempo y frecuencia; así mismo, es posible la Adaptación dinámica de tasa y configuración de haces de antena. Canal que comparte el enlace descendente.
- *Canal de verificación - Paging Channel (PCH)*: Este canal soporta recepción discontinua (modo DRX). Debe difundirse en toda el área de la célula.

- *Canal de difusión en grupo - Multicast Channel (MCH)*: Este canal soporta asignación semiestática de los recursos radio. Debe difundirse en toda el área de la célula.

2.5.1.5.2. Enlace ascendente

- *Canal compartido para el enlace ascendente - Uplink Shared Channel (UL-SCH)*: Canal encargado de transportar información de: señalización y usuario. Permite la asignación semiestática y dinámica de recursos; además, de configurar los haces de antena. Canal que comparte el enlace ascendente.
- *Canal de acceso aleatorio - Random Access Channel (RACH)*: Canal encargado para el acceso inicial del equipo del usuario a la red.

2.5.2. Capa Física

En LTE, esta capa se encarga de proporcionar el servicio de transporte. La técnica de comunicaciones OFDMA es utilizada para el enlace descendente, mientras que para el ascendente es utilizado la técnica SC-FDMAD; la separación de las subportadoras en estos casos es de 15 KHz. Dentro de las funciones principales que destaca en esta capa son:

- Detección de errores, codificación y decodificación, en el canal de transporte.
- Combinación “soft” de HARQ.

2.5.2.1. Concepto del bloque de recursos físicos – Physical Resource Block (PRB)

El bloque de recursos físicos, es conocido como el mínimo elemento de información que puede ser asignado por el eNB a un terminal móvil. En la Figura 50 se puede apreciar el enfoque desde el punto de vista gráfico acerca del concepto del PRB.

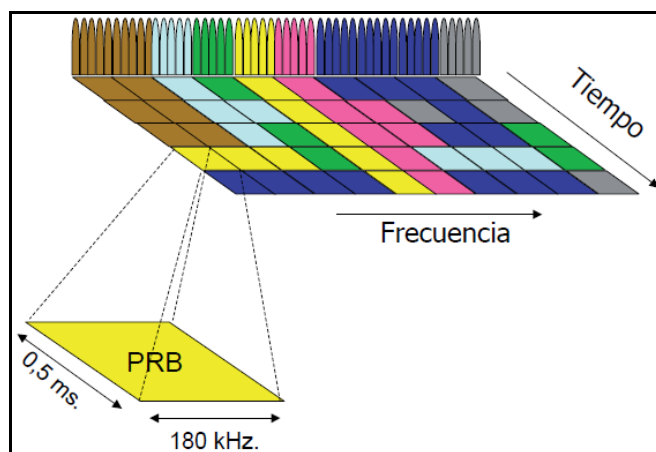


Figura 50: Concepto del bloque de recursos físicos – PRB [13]

De la ilustración de la figura, se puede resaltar de un PRB que:

- Ocupa 180 KHz de banda equivalente a doce (12) subportadoras equiespaciadas 15 KHz.
- Dependiendo de la longitud de prefijo cíclico se transmiten 6 o 7 símbolos de OFMDA.
- La duración es de 0,5 ms.

Es importante recalcar que el número subportadoras es 12 veces el número de PRB más una; esta subportadora conocida como central, tiene como función facilitar los mecanismos de ajuste y sincronización en frecuencia del receptor. En la Tabla 1 podemos apreciar de mejor manera el ancho de banda asociado con el número de portadoras y PRB.

Tabla 1: Relación de Ancho de Banda, con el número de portadoras y PRB [13]

Ancho de Banda	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Número de PRB	6	15	25	50	75	100
Número de subportadoras	73	181	301	601	901	1201

Continuando con el análisis, se puede observar que un PRB cuenta con varios símbolos agrupados en las subportadoras, obteniendo disponibilidad de recursos, donde es viable la ubicación de símbolos en: QPSK, 16 QAM o 64 QAM. Si partimos como referencia la modulación con 64 QAM que trasmite 6 bits/símbolo, da como resultado que un PRB trasmite hasta 504 bits; concluyendo que:

Velocidad bruta de transmisión pico es alrededor de 504 bits / 0,5 ms \approx 1 Mbps.

En la Tabla 2 se resume por los diferentes anchos de banda las velocidades picos globales en la interfaz.

Tabla 2: Velocidad de transmisión pico en la interfaz aire [13]

Ancho de Banda	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Número de PRB	6	15	25	50	75	100
Velocidad pico total [Mbps]	\approx 6	\approx 15	\approx 25	\approx 50	\approx 75	\approx 100
Velocidad pico bruta de usuario [Mbps]	\approx 5.1	\approx 12.8	\approx 21	\approx 42.5	\approx 63.7	\approx 85

De esta tabla, se puede realizar las siguientes puntualizaciones:

- Los canales de señalización del sistema, así como también los datos del usuario incluyen en los valores de la velocidad pico total.
- Las velocidades expuestas corresponden a un sistema sin multiplexado espacial, es decir, sin MIMO. Si se considerare con una estructura MIMO 2x2, se estimaría que su velocidad pico sería duplicado, afirmando que la

interfaz aire de LTE alcanzaría hasta 150 Mbps en su enlace descendente si cuenta con 20 MHz de ancho de banda.

- Es importante resaltar que el cálculo especificado en el anterior ítem es una estimación. Las velocidades pico reales obedecen a varios factores tales como: tipo de despliegue realizado por el operador, cantidad de usuarios concurrentes en la celda, calidad del canal radio, calidad asociada, capacidad del terminal entre otros.

2.5.2.2. Estructura de trama tipo 1

Esta estructura es válida para aquellos sistemas que usan FDD, aplicando al enlace tanto ascendente como descendente. La representación gráfica de esta trama se puede apreciar en la Figura 51:

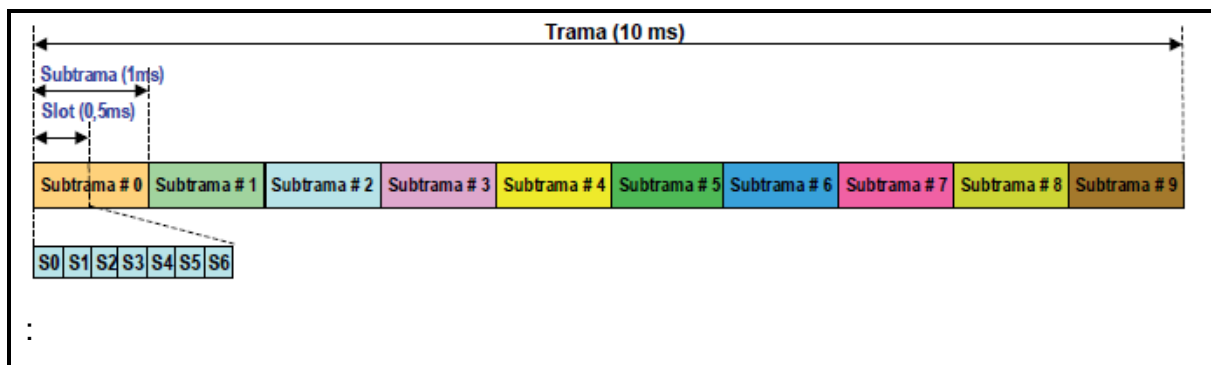


Figura 51: Estructura de trama tipo 1 [13]

De esta figura, se puede realizar el siguiente análisis:

- La estructura se divide en tramas de 10 ms.
- Cada trama está compuesta por 20 ranuras temporales, conocidas también como slot o TS de duración de 0,5 ms.
- Una unidad básica está formada por dos slots conocida también como subtrama de una duración total de 1 ms.

2.5.2.3. Estructura de trama tipo 2

Al igual que su similar tipo 1, está compuesta el eje temporal en tramas de 10 ms. Cada trama a su vez está compuesta por 10 subtramas, cada una de duración de 1 ms, esta estructura se la representa mediante la Figura 52:

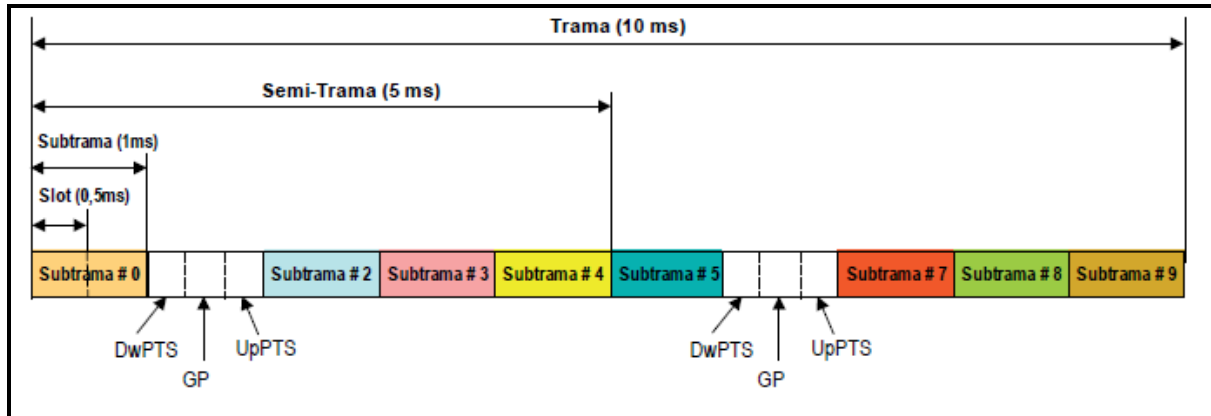


Figura 52: Estructura de trama tipo 2 [13]

Esta estructura es válida para aquellos sistemas que usan TDD, contando con más flexibilidad que su similar de tipo 1. En los enlaces: ascendente y descendente contempla subtramas de transmisión.

En los procesos de transmisión y recepción cuenta con subtramas especiales que contemplan periodos de guarda y símbolos piloto. La subtrama especial surge para facilitar la transición entre los enlaces descendente y ascendente; cabe resaltar que esta subtrama cuenta con una configuración variable, permitiendo distinguir tres campos que son:

- DwPTS: Campo cuya funcionalidad es la transmisión en el enlace descendente, contando con una longitud mínima de un símbolo OFDM. A fin de localizar la señal de sincronización primaria se utiliza el primer símbolo OFDM. Si existiese símbolos sobrantes en este campo pueden transportar señales de referencia o incluso datos.
- UpPTS: Campo cuya funcionalidad corresponde a la transmisión en el enlace ascendente; utilizado para transmitir un preámbulo corto de acceso aleatorio compuesto por 2 símbolos OFDM. Si existiese símbolos restantes en este campo pueden transportar señales de referencia o incluso datos.

- Periodo de guarda (PG): Campo que reserva entre la transmisión de trama.

2.5.2.4. Capa Física: Enlace Descendente

En este apartado se procederá a analizar estos canales, mismos que son utilizados a fin de transmitir información consignada a los usuarios localizados en el perímetro de cobertura de una determinada celda; así como también las estrategias de control y señalización a fin de realizar la transferencia de la información.

2.5.2.4.1. Señales Físicas

Estas señales son utilizadas en el enlace descendente de LTE a fin de facilitar la demodulación de las señales OFDMA, estableciéndose señales de: referencia y sincronización temporal.

- *Señales de Referencia – RS*: Estas señales se localizan en un símbolo OFDM y una subportadora, siendo seis subportadoras la separación entre cada una.

Son utilizadas para:

- Obtener medidas de calidad.
 - Implementar mecanismos de localización de celdas.
 - A fin de realizar el procedimiento de demodulación se efectúa la estimación de la respuesta del canal que se requiere.
- *Señales de Sincronización Temporal – SCH*: Estas señales son utilizadas para establecer estrategias de sincronización, primordialmente a nivel de subtrama y trama. Una vez que se conecta un determinado terminal hacia la red, el proceso principal que se efectúa es sincronizar y obtener los parámetros iniciales. La identificación de celda obtenida por estas señales es utilizada a fin de determinar en qué recursos van a ser situadas. Estas señales se despegan en:

- *Primary SCH o P-SCH*: Encargada de la sincronización temporal a nivel de subtrama, a través de procedimientos de semejanza entre la señal recibida y una secuencia de referencia almacenada en el receptor.
- *Secondary SCH o S-SCH*: Encargada de la sincronización temporal a nivel de trama, manteniendo el mismo procedimiento que P-SCH.

2.5.2.4.2. Canales Físicos en el enlace descendente

Los canales de: tráfico y control, son utilizados en el enlace descendente por el sistema LTE, canales que serán analizados en este apartado.

- *Canales de tráfico*: Se clasifican en:
 - Canal físico compartido – Physical Downlink Shared Channel (PDSCH): Encargado de transmitir información tales como: la entregada por la capa MAC, System Information Blocks y en general la información relevante del usuario. La modulación que utilizan son: QPSK, 16QAM y 64QAM. El mapeo utilizado por este canal es mediante Physical Resource Blocks -PRBs.
 - Canal físico de difusión en grupo - Physical Multicast Channel (PMCH): Encargado de transmitir información Multimedia Broadcast and Multicast System – MBMS en redes iso-frecuencia (Single-Frequency Networks – SFN). La estructura de este canal es similar a PDSCH, diferenciándose en:
 - No es viable la coexistencia en los canales PDSCH y PMCH de una misma trama.
 - Utilización siempre del prefijo extendido, toda vez que, puede recibir la señal de múltiples eNBs un terminal.

- No es viable aplicar el mecanismo de HARQ, toda vez que la señal transmitida puede verse por varios terminales móviles de manera simultánea.
- *Canales de Control:* Se dividen en:
 - Canal físico de difusión - Physical Broadcast Channel (PBCH):
Compuesta por catorce bits mismos que:
 - Cuatro bits: Determina en una celda el ancho de banda que se ha utilizado.
 - Tres bits: Define la estructura de PHICH que es utilizado para la transportación de información HARQ.
 - Siete bits: Identifica la cantidad de tramas SFN.

Estos catorce bits adicionando diez bits de relleno conforman un grupo de bits de transporte y a su vez se le añade diez y seis bits de código de redundancia cíclica a fin de detectar errores en recepción.

Este canal se caracteriza por utilizar QPSK, cuya transmisión se efectúa de manera consecutiva en cuatro tramas. Este canal no requiere ser señalizado a fin de ser demodulado y a partir de una sola recepción se podría decodificar.

- Canal físico de control - Physical Downlink Control Channel (PDCCH):
Encargado de transportar Información de control – Downlink Control Information (DCI), misma que contiene información de asignación de recursos para los canales de aviso (PCH) y de tráfico compartido (DL-SCH).

Se debe señalar que el DCI está conformado por la adición de uno o más CCEs; y, éstos a su vez están conformados por nueve grupos de cuatro REGs que mantienen relación con la capa física. Cada REG

se mapea a través de 4 símbolos QPSK, lo que significa que ocupa 4 subportadoras.

En virtud de las condiciones del canal, número de retransmisiones efectuadas en el enlace ascendente y los recursos de señalización y control necesarios para transmitir los reconocimientos ACK/NACK en el enlace descendente, cada eNB determina el número de CCEs asignados a un canal PDCCH.

- Canal de control FI - Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH): Encargado de informar al equipo de usuario la existencia de uno o más símbolos que se utilizarán a fin de efectuar la transmisión del canal PDCCH, para el efecto se utiliza el CFI.
- Canal físico HARQ - Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH): Encargado de transportar los ACK a fin de implementar en el enlace ascendente la estrategia de HARQ. Este canal utiliza la modulación BPSK.

2.5.2.5. Capa Física: Enlace Ascendente

En este apartado se procederá a analizar los canales físicos a fin de transmitir información desde el equipo de usuario hacia un determinado eNB. Así mismo, se procederá a estudiar las señales físicas, mismas que aprueban al eNB la demodulación y sincronización de las señales SC-FDMA que serán transmitidos por los equipos de usuario en un determinado perímetro de cobertura cubierta por eNB.

2.5.2.5.1. Señales de referencia en UL

Estas señales se clasifican en:

- *Demodulation Reference Signal (DM-RS)*: Son utilizadas a fin de estimar la respuesta necesaria del canal de tal manera que se efectúe la demodulación. Estas señales transmiten datos de usuario (paquetes PUSCH) o información de control (PUCCH), este tema se lo analizará en los apartados siguientes.
- *Sounding Reference Signals (SRS)*: Son utilizadas a fin de sondear la calidad del canal de transmisión. Cabe destacar que estas señales no se encuentran relacionadas a ningún tipo de transmisión de control o de datos. Así mismo, estas señales son utilizadas para: gestionar el control de potencia y recursos de radio (scheduling), proporcionar estrategias de parametrizaciones iniciales del equipo del usuario, entre otros.

2.5.2.5.2. Canales Físicos en el enlace ascendente

También cuentan con canales de: tráfico compartidos y de control, mismos que se procederán a analizarlos a continuación:

- *Physical Uplink Shared Channel – PUSCH*

Conocido también como canal de tráfico, se encarga de enviar la información del usuario utilizando para ello señales SC-FDMA. El gestor de recursos de radio (scheduler) es quien determina el número de subportadoras a ser utilizados, para ello utiliza el canal PDCCH. Se enfatiza que utiliza modulación QPSK, 16QAM y 64 QAM; así como también, se debe señalar que este canal no es dedicado, en otras palabras, es asignado a un determinado usuario específicamente cuando requiera iniciar la transmisión en el enlace ascendente; así como también cuando las peticiones se realicen mediante el canal PUCCH.

- *Canales de Control*

Estos canales se dividen en:

- *Canal físico de control - Physical Uplink Control Channel (PUCCH)*: Este canal permite la transmisión de información de control de varios usuarios simultáneamente utilizando para el efecto CDM, ya sea en tiempo, frecuencia o ambos a la vez. Comúnmente este canal utiliza

la modulación BPSK y QPSK. Por medio de este canal se transmite información sustentada en ACK, Scheduling Request y Channel Quality Indicator - CQI.

- *Canal de acceso aleatorio - Physical Random Access Channel (PRACH):* El acceso a este canal se efectúa de forma aleatoria, implicando este acceso a las capas superiores y física.

En el caso específico de la capa física, el equipo de usuario envía un preámbulo a fin de iniciar la conexión hacia el sistema, si el eNB lo detecta mediante el canal PDSCH, se procede a emitir una contestación con la identificación donde el preámbulo se manifestó; permitiendo identificar al equipo de usuario al cual va destinada la respuesta, así como también la asignación inicial de recursos: frecuencia –tiempo. De no detectar el preámbulo el eNB, el móvil vuelve a realizar el proceso expuesto aumentando la potencia, hasta que sea detectado por el eNB.

En el caso de las capas superiores, se procede a elegir las subportadoras libres, mismas que van a ser utilizadas a fin de enviar el preámbulo de acceso.

2.6. GESTIÓN DE RECURSOS RADIO – RADIO RESOURCE MANAGEMENT (RRM) [13], [21], [28]-[30]

La gestión de recursos radio o RRM, es encargada de racionalizar recursos garantizando ciertos niveles mínimos de calidad de servicio. Estas funciones tienen cierto grado de complejidad, es por ello que la gestión de recursos está compuesta por varias funciones encargadas de gestionar distintos aspectos de la interfaz radio. En los siguientes apartados se procederá a analizar cada una de ellas, no obstante, cabe recalcar que en LTE todas estas funciones se encuentran en el eNB.

2.6.1. Control de admisión radio – Radio Admission Control (RAC)

Esta función es encargada de gestionar el acceso hacia la red cuando realizan nuevas peticiones, aceptándolas siempre y cuando se mantenga la calidad de los servicios portadores de radio de las nuevas conexiones como de las ya establecidas, de no hacerlo se procede a rechazar dichas peticiones.

Un adecuado y eficiente funcionamiento del RAC es relevante en el proceso de aceptar o no una nueva petición, dado que, en caso de aceptarla y no contar con los recursos necesarios desencadena en una insatisfacción del usuario, por lo contrario, en caso de rechazar la nueva petición y de contar con los recursos necesarios, incrementaría la tasa de bloqueos conllevando también al descontento de los usuarios.

2.6.2. Control de servicios portadores radio – Radio Bearer Control (RBC)

Esta función es encargada de establecer y liberar los servicios portadores de radio; y, está relacionada con el control de admisión de radio, dado que, una vez que una petición es aceptada por RAC, se debe establecer el RC correspondiente efectuada a cargo del RBC, considerando para ello los requerimientos de calidad de servicio.

Además de la función descrita, RBC cumple con otras funciones tales como: liberar RB cuando existe poca calidad o se termina una sesión, mantenimiento de QoS mientras dura una sesión entre otros.

2.6.3. Scheduling de paquetes

Esta función es encargada de asignar recursos radio a los usuarios dinámicamente a fin de que puedan realizar transmisiones de forma ordenada. En LTE, es una función relevante, toda vez que se realizan transmisión de: datos y las del plano del usuario mediante canales compartidos, implicando que pueden afectar notablemente la calidad de servicio del usuario.

En la Figura 53 se aprecia la interfaz radio LTE que define una rejilla tiempo – frecuencia de recursos radio, donde se analiza que, el mínimo recurso radio asignable a un usuario es un bloque de 180 kHz en una subtrama de 1ms, llamada *Physical Resource Block – PRB*.

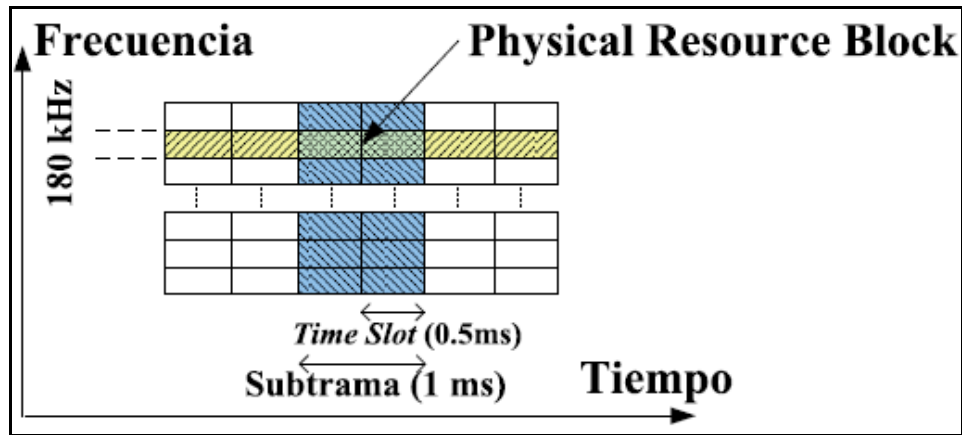


Figura 53: Rejilla tiempo – frecuencia en LTE [13]

En LTE, Scheduling se ejecuta en el eNB; en los enlaces de: bajada y subida, permitiendo asegura ortogonalidad en las transmisiones.

2.6.3.1. Información de estado del canal

A fin de contar con la información de estado del canal, es necesario que el scheduler tenga una estimación del canal por cada usuario en los enlaces de bajada y subida.

- Estimación de canal en el Enlace de Bajada

En este proceso de estimación, el eNB configura a los terminales a fin de que envíen CSR (Channel Status Reports) de todo el ancho de banda del scheduling o de una subbanda. Cabe recalcar que, el CSR contiene recomendaciones realizadas por el terminal indicando al enlace de bajada los parámetros de transmisión más idóneos. Esta recomendación puede o no ser acogida por el eNB.

- Estimación de canal en el Enlace de Subida

En este proceso de estimación, el eNB puede estimar el canal analizando la señal recibida en los PRG asignados a un determinado usuario para la transmisión. Para el efecto, el eNB configura a los terminales activos y transmitan señales conocidas como Sounding Reference Signals (SRS), de tal manera que permite estimar el canal en cualquier PRB.

2.6.3.2. Información de estado del buffer

La información del estado del buffer es una estrategia relevante a fin de asignar los recursos. En el enlace de bajada no existe inconvenientes en conocer el estado del buffer en el eNB, no así en el enlace de subida. Para el efecto, el terminal puede informar a la red el estado de sus buffers mediante BSR (Buffer Status Report). Éstos indican la cantidad de datos esperando en los buffers del terminal por cada canal lógico, mismos que están incluidos en la cabecera MAC.

2.6.3.3. Información de disponibilidad de potencia

La disponibilidad de potencia se define como: la diferencia entre la potencia máxima en el transmisor y la potencia nominal de transmisión necesaria, a fin de asegurar la correcta recepción de los datos dado un determinado formato de modulación y codificación.

La información de disponibilidad de potencia es conocida por el eNB en el enlace de bajada, mediante el mensaje conocido como *power headroom*, mismo que está incluido en la cabecera MAC. La realidad es distinta en el enlace de subida, toda vez que indirectamente de la distancia entre el terminal y el eNB; además de la interferencia.

2.6.3.4. Adaptación dinámica del enlace

La adaptación dinámica del enlace consiste en la selección del formato de modulación y codificación más idóneo al momento de efectuarse transmisiones de cada usuario. Este mecanismo se ha implementado mediante la tasa binaria (*rate control*), mecanismo que consiste en variar la tasa binaria asignada a un terminal activo en función de la calidad del canal. Es decir, el terminal recibirá una tasa binaria alta si la calidad del canal es aceptable, caso contrario recibirá una tasa binaria baja.

2.6.4. Inter-Cell Interference Coordination ICIC

Esta función es encargada de asegurar la ortogonalidad entre las transmisiones de usuarios en una misma celda, no obstante, no la gestiona entre transmisiones de usuarios conectados a diferentes celdas.

Las interferencias en los sistemas celulares se clasifican en:

- *Intracelular*: Se producen entre transmisiones desde – hacia usuarios cuyo servicio efectúa una misma celda.
- *Intercelular*: Se producen entre transmisiones desde – hacia usuarios cuyo servicio efectúa por diferentes celdas.

En LTE no existe la interferencia intracelular, debido a la función *scheduling* se asegura que un PRB sólo puede ser asignado a las trasmisiones de un único usuario en cada subtrama. No obstante, se presentan interferencias intercelulares.

2.6.5. Control de la movilidad

Esta función es encargada de asegurar que las terminales se encuentren en óptimas condiciones a fin de comunicarse con el sistema. El sistema mediante varios procedimientos, permite a los usuarios moverse con libertad por el área de cobertura. Adicionalmente, surge la necesidad de implementar estrategias RRM de control de la movilidad. Antes de entrar a detallar las estrategias RRM, se analizará brevemente los escenarios de movilidad en LTE, que son:

- *Intra-frequency*: Es el escenario más habitual, y éste, hace referencia a eventos de movilidad que implica un cambio de celda entre celdas que se encuentran desplegadas en una misma banda de frecuencia.
- *Inter-frequency*: Éste, hace referencia a despliegues del operador donde hay varias bandas de frecuencia LTE trabajando en paralelo.
- *Inter RAT*: Posee características similares al escenario *inter-frequency*, existiendo múltiples tecnologías de acceso radio.

2.6.5.1. Etapas para la ejecución de estrategias RRM de movilidad

En la Figura 54 se puede apreciar las etapas para la ejecución de estrategias RRM de movilidad:

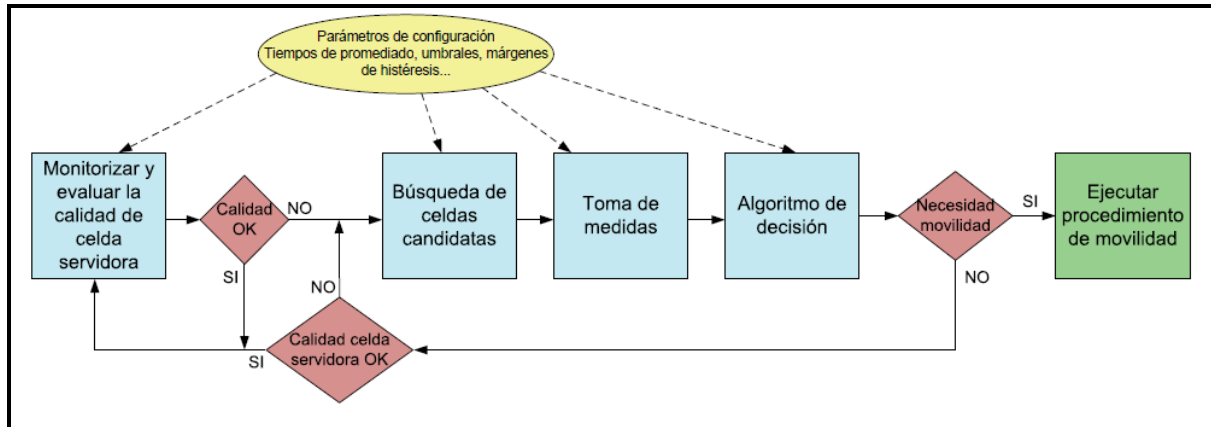


Figura 54: etapas para la ejecución de estrategias RRM de movilidad [13]

A continuación, se procederá a explicar el funcionamiento de las estrategias:

Inicia con el monitoreo y evaluación periódica de la calidad de la señal recibida desde la celda servidora por parte del terminal, si la calidad supera un umbral determinado, entonces el terminal continua con ese estado, por lo contrario, se considera que es necesario ejecutar el procedimiento de movilidad, ejecutándose las siguientes etapas:

- Inicia una sincronización de frecuencia y símbolo a una celda o celdas a fin de determinar la identidad física de la celda, gracias a dicha identidad se podrá determinar la calidad de la señal recibida y su potencia. Esa información es almacenada en una lista.
- Una vez que se cuenta con la lista de celdas candidatas se procede a tomar las medidas de la intensidad y calidad de la señal recibida, parámetros que permitirán valorar si es o no pertinente la ejecución del procedimiento de movilidad, procedimiento que es ejecutado por el algoritmo de decisión.
- Finalmente, es importante resaltar que las etapas anteriormente descritas, dependerán de los parámetros definidos por el operador.

2.6.5.2. Estrategias de reelección de celda

En LTE, el terminal ejecuta de forma autónoma esta estrategia, consistiendo en: monitorear la celda servidora, encontrar otras celdas, tomar medidas y decidir si es necesario una nueva celda. Con esta estrategia, se logra reducir notablemente la señalización de la interfaz radio, y de esta manera se evita mantener comunicación constante entre el eNB y el terminal. Es así que, un terminal podría ir cambiando sin ningún inconveniente de celdas servidoras, sin conectarse a la red necesariamente.

2.6.5.3. Estrategias de handover

A fin de realizar la estrategia de *handover*, es indispensable para la red LTE conocer las medidas de un determinado terminal de la señal recibida desde su celda servidora y desde otras que se encuentran cerca. Para el efecto, la red efectúa una configuración en el terminal a fin de que éste monitoree y evalúe los resultados de las celdas vecinas; y dichos resultados sean enviados mediante mensajes denominados *measurement reports*. Este monitoreo se puede apreciar en la Figura 55:

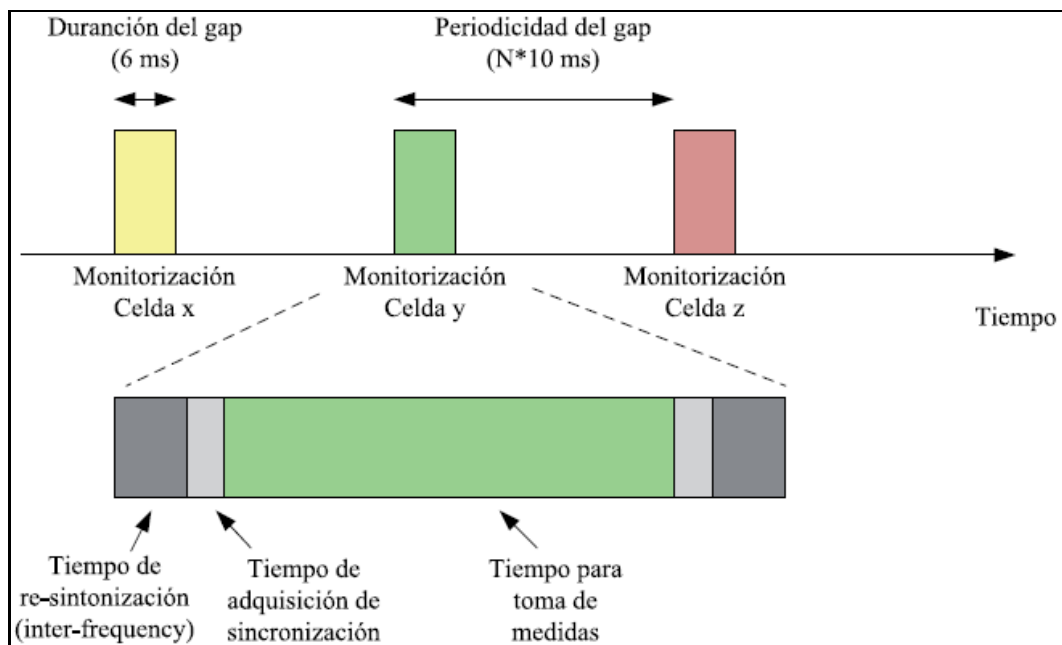


Figura 55: Monitoreación de celdas vecinas en LTE [13]

Así mismo, la red configura y establece un patrón de monitorización con un determinado tiempo de duración de 6ms, a este periodo de tiempo se le conoce también como *gap*.

2.6.6. Balanceo de carga

Esta función es encargada de gestionar distribuciones no uniformes de carga de tráfico entre las diferentes celdas a fin de ajustar la demanda de recursos, para el efecto se aplican configuración a fin de lograr cambiar la celda servidora a los usuarios.

2.6.7. Control de potencia

Esta función es encargada de gestionar adecuadamente la potencia de transmisión en el terminal y el eNB, de tal manera que garantice la adecuada recepción de la señal desde los puntos de la zona de cobertura en un eNB. Se debe destacar que un caso particular son los terminales de los usuarios, dado que deben disminuir la potencia, a fin de prolongar la vida útil de las baterías.

2.7. CONCLUSIÓN

Se ha analizado la arquitectura LTE, para el efecto se tuvo que analizar previamente las arquitecturas de: 3GPP y E-UTRAN; determinándose que cada red de acceso cuenta con su correspondiente interfaz de radio. Es importante destacar que ésta arquitectura brinda servicios cuya transferencia de información se basa en IP. De la misma manera, la arquitectura de ésta tecnología permite la interconexión entre redes de acceso 3GPP y las que no son, utilizando para el efecto varias interfaces de la EPC.

Así mismo, en los apartados correspondientes se analizó las gestiones de sesiones, movilidad y seguridad en LTE. Es importante destacar que, en la gestión de sesiones involucra los servicios de conectividad IP y portador EPS, modelo de QoS, sistema PCC; mientras que, en la gestión de movilidad involucra la localización, handover y procedimientos; y, en la gestión de movilidad abarca la seguridad a: acceso a la red e infraestructura; y, procedimientos de gestión de seguridad.

CAPÍTULO 3

LONG TERM EVOLUTION ADVANCED – LTE ADVANCED

3.1. INTRODUCCIÓN ^{[13], [21], [31]}

En este capítulo se estudiará al sistema Long Term Evolution Advanced – LTE Advanced, especificada en la versión 10 del 3GPP. Así mismo, cabe resaltar que esta tecnología al agregar características relevantes a LTE Advanced versión 8, alcanzará con las definiciones técnicas definidas por IMT-Advanced, alcanzando el objetivo final que es ser un estándar 4G.

La evolución de LTE es LTE Advanced (LTE-A), ésta cuenta con las siguientes mejoras: capacidad de transmisión con ancho de banda que superan los 100MHz, eficiencia espectral extremadamente alto, funcionamiento con canales de radio que superan los 40 MHz, transmisiones coordinadas multipunto entre otros.

Una de las características fundamentales de LTE-A es que tienen compatibilidad con versiones previas a la misma, y de esta manera mantienen el servicio con sus clientes mientras los equipos son actualizados y evolucionados.

3.1.1. Bandas de Frecuencia de LTE-A ^{[13], [21], [32]-[33]}

Como se expuso en apartados anteriores, existen dos formas de mejorar el rendimiento de LTE, estas son: utilización de mayor espectro radioeléctrico y aprovechando el espectro disponible eficientemente.

Las bandas de frecuencias en el mundo que cuenta LTE son:

- América: 700, 1700 AWS y 2600 MHz.
- Europa: 800, 1800 y 2600 MHz.
- Asia: 1800 y 2600 MHz.
- Australia: 1800 MHz.

3.1.2. Arquitectura de LTE-A

La arquitectura de LTE-A es la misma que LTE, incluyendo únicamente una nueva arquitectura en la red de acceso, que involucra el uso de relay nodes; tema que se abordará en el apartado 3.5 del presente capítulo.

La arquitectura del sistema LTE-A está compuesta por bloques funcionales, siendo estos los siguientes: E-UTRAN, EPC, IMS y UE. De la misma manera, las interfaces y las entidades de redes son éstas las mismas utilizadas en LTE.

Tal como se describió en el capítulo anterior, se procederá a describir los elementos que constituyen la arquitectura de LTE-A.

- eNB es el elemento fundamental de E-UTRAN, mismo que mantiene comunicación con sus homólogos eNBs mediante la interfaz X2. Así mismo, eNB mantiene comunicación con la EPC a través de las siguientes interfaces: S1-U del plano de usuario y S1 – MME del plano de control.
- Las entidades de red que integran la EPC son: P-GW, S-GW y MME. Mediante la interfaz S11 se comunican las entidades S-GW y MME. Mediante la interfaz S5/S8 se comunican las entidades P-GW y S-GW; y, mediante la interfaz S10 se comunican entre entidades MMEs. Para finalizar mediante la interfaz SGi se comunican entre la EPC con plataformas de servicios externos.
- En cuanto a protocolos se refiere específicamente a los utilizados en las tres interfaces que son: radio, S1 y X2, éstos se componen en base a los planos de: usuario y control. Se debe mencionar que, el plano de usuario contempla aquellos protocolos que son utilizados para el envío del tráfico, es decir paquetes IP, a fin de ingresar a los servicios por parte de los terminales. Por otro lado, el plano de control contempla aquellos protocolos que son indispensables a fin de sustentar funciones y procedimientos de varias interfaces.

- Protocolos en la interfaz de radio: Constituidos por la capa de enlace (conocida también como capa de nivel 2) y la capa física. Dentro de la capa de enlace cuenta con los siguientes protocolos: PDCP, RLC, MAC. Así mismo, cuenta con los siguientes protocolos: NAS y RRC.
 - Protocolos de las interfaces S1 y X2: Para la interfaz S1 cuentan con los siguientes protocolos en el plano de usuario: GTP-U, UDP, IP capas de: enlace y física; mientras que para el plano de control cuenta con los siguientes protocolos: S1-AP, SCTP, IP y capas de: enlace y física. Para la interfaz X2 utilizan los mismos protocolos que la interfaz S1, salvo el protocolo X1-AP que reemplaza al protocolo S1-AP.
- Se debe destacar que la interfaz radio de LTE-A son fundamentalmente los utilizados por LTE. Es decir, los canales: lógicos, físicos y de transporte son utilizados para uplink y downlink.

Se concluye que LTE-A es una evolución de LTE en cuanto se refiere a la capa física; por ello la consideración de ser nominada tecnología 4G.

3.1.3. Características de LTE-A ^{[13], [21], [34]-[35]}

Son varias las características con las que cuenta LTE, estos son los más relevantes:

- Transmitir mediante múltiples antenas para los enlaces de subida y bajada mejorada.
- Agregación de portadora.
- Relaying.
- CoMP (Coordinated multipoint transmission and reception).

Estas características serán analizadas a detalle en los siguientes apartados.

3.1.3.1. AGREGACIÓN DE PORTADORA ^{[13], [21], [36]-[40]}

Como tecnología 4G LTE Advanced requiere operar con 100 MHz de ancho de banda. En virtud que no existe una operadora que sea capaz de ofrecer dicha capacidad; LTE – A, requiere agregar portadoras alcanzando hasta 5 componentes de portadora – Components Carriers (por sus siglas en inglés).

La agregación de portadora está apta para soportar varios arreglos de CCs, siendo éstos CCs: heterogéneos u homogéneos en sus anchos de banda, diferentes bandas de frecuencia y adyacentes o no adyacentes.

Si un equipo de usuario está apto a fin de utilizar agregación de portadora, este se conecta a una celda de servicio primario - PCell y a más de 4 celdas de servicio secundarios - SCells.

- *PCell*: Celda encargada fundamentalmente de:
 - Proporcionar datos de movilidad.
 - Establecer conexión RRC (Radio Resource Control), permitiendo mantener el control de las CCs parametrizadas en el equipo de usuario.
 - Sistemas de información para configuración de celdas de servicio.
 - Procesos de seguridad,
 - Entre otras.
- *SCells*: Celda donde es factible parametrizaciones post conexión a fin de brindar tanto información como configuración de recursos de radio.

Los components carriers pertenecientes a:

- Un PCell se les denomina Downlink and Uplink Primary Component Carriers (PCCs).
- Un SCell se les denomina denomina Downlink and Uplink Secondary Component Carriers (SCCs).

3.2. TÉCNICAS DE MÚLTIPLES ANTENAS PARA LTE ADVANCED [13], [21], [36], [41], [42]

3.2.1. MIMO mejorado en LTE Advanced

En LTE-A se introdujo la innovación y utilización de múltiples antenas tales como: MIMO 8X8 en enlaces de bajada y MIMO 4X4 en el enlace de subida, destacándose dos opciones que son: single-site MIMO y multi-site MIMO.

- *Single-Site MIMO*: Es la forma de combinar haces y multiplexación espacial.
- *Multi-Site MIMO*: Mejora el rendimiento en el límite de cobertura de la celda a través de la multiplexación espacial de varias estaciones base, que a su vez los recursos espectrales son compartidos, introduciendo las técnicas de: Co-operativa MIMO y Coordinated multipoint – CoMP.

3.2.2. MIMO en el enlace de bajada de LTE Advanced

3.2.2.1. Transmisión de Múltiples Antenas en el enlace de bajada

Las dos técnicas utilizadas por LTE-A para la transmisión de la información son: SU-MIMO y MU-MIMO. En la Figura 56 se expone la estructura de este tipo de antena.

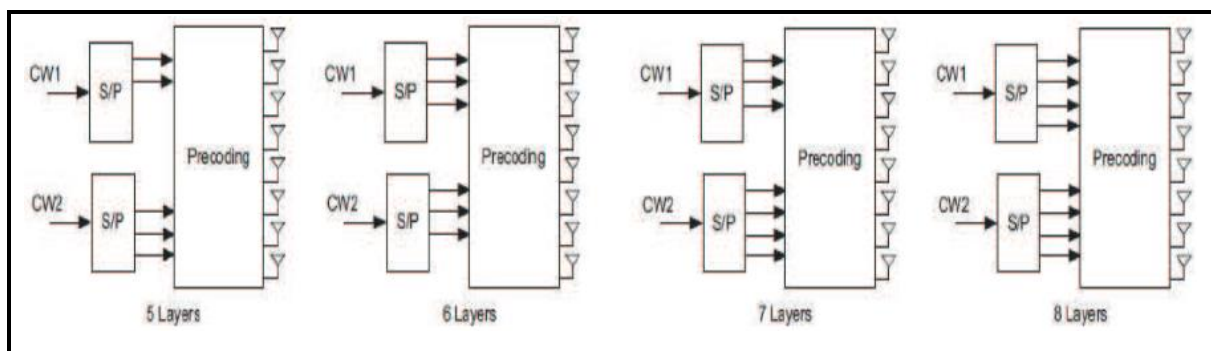


Figura 56: Codewords y layers de antena [21]

De la figura arriba mostrada, se resalta que:

- SU-MIMO: La tendencia a usar es: 5,6, 7 y hasta 8 capas espaciales, 8 puertos de antena y máximo 2 codewords; a fin de optimar su velocidad de transmisión.
- MU-MIMO: Se basa en la forma dinámica de intercambiar entre SU-MIMO y MU-MIMO, además de la mejora que se efectúa al transmitir por el canal PDSCH. La multiplexación ortogonal de las señales de referencia asignadas a los equipos de usuario, hace posible estimar de forma precisa el canal así como también mejora los procesos de cancelación de interferencia en el equipo de usuario. En el siguiente apartado se explicará más detalladamente sobre las señales de referencia.

3.2.2.2. Señales de Referencia en el enlace de bajada

Estas señales son utilizadas por los equipos de usuario, cumplen dos funciones principalmente que son:

- Demodulación de los datos.
- Comprobar la información del canal radio.

En LTE se usa únicamente las señales Common Reference Signals - CRSs, aumentando dos señales más RSs para LTE-A que son: DM-RS y CSI-RS. A continuación, se procederá a realizar un análisis de las señales mencionadas:

- ***Downlink Reference Signals for Demodulation (DM-RS):*** Señales localizadas en el canal PDSCH del RBs del equipo de usuario, experimentando así, igual precodificación aplicada a los símbolos de datos, donde, no es necesario se establezca la señalización y precodificación para estas señales. No obstante, en LTE-A se han implementado sin número de técnicas de múltiples antenas establecidas mediante la conformación de haces de radiación a fin de efectuar la precodificación.
- ***Channel State Information Reference Signals (CSI-RS):*** Estas señales se caracterizan por las siguientes funcionalidades principales:

- Posibilitar al equipo de usuario la estimación del CSI de múltiples celdas en lugar de su propia celda de servicio, implementando de esta manera la transmisión cooperativa multi-celda.
- Conseguir información relevante del estado del canal mediante las antenas transmisoras, específicamente a través de sus puertos, a fin de apoyar en las actividades de precodificación de la información que efectúa el eNB.

El diseño de estas señales se basa en:

- En el dominio de la frecuencia, estas señales deben estar uniformemente espaciadas.
- En el dominio del tiempo es anhelado reducir las subtramas que contengan a estas señales a fin de que el equipo de usuario estime las CSIs propias y de las otras celdas.
- Estas señales a fin de contar con una precisa estimación del estado del canal, deben estar multiplexadas ya sea en una determinada antena en diferentes puertos dentro de una celda como de celdas diferentes.

3.2.3. MIMO en el enlace de subida de LTE Advanced

3.2.3.1. Transmisión de Múltiples Antenas en el enlace de subida

La transmisión SU-MIMO se efectúa en 4 capas especiales a fin de que, en el canal PUSCH se aumente la velocidad de transmisión. Las modalidades que son:

- Transmisión 1: Bajo una única antena.
- Transmisión 2: Bajo múltiples antenas, implicando que el equipo del usuario deberá ser configurado a fin de transmitir utilizando dos o cuatro antenas.

3.2.3.2. Esquema de acceso mejorado en el enlace de subida

En LTE-A no se trabaja con bloques de espectro continuo, así como tampoco la utilización de la portadora única, utilizando en lugar de ello la tecnología en agregación de portadora expuesta en los apartados anteriores; este esquema particular es SC-FDMA.

En la Figura 57 se puede apreciar cómo opera este esquema de acceso. Se visualiza que está compuesta por dos CC; cada una de ellas se han asignado los canales les PUSCH y PUCCH, que corresponden a dos conexiones.

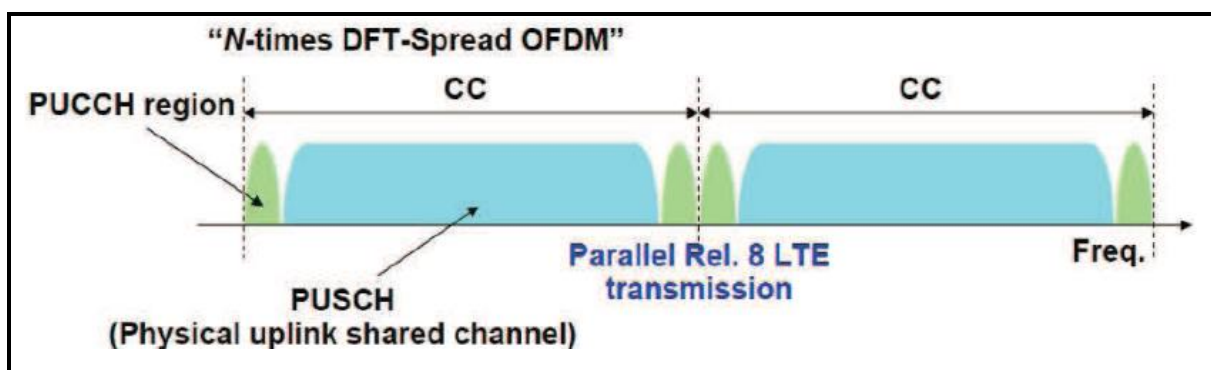


Figura 57: Representación de esquema de acceso múltiple [33]

3.2.3.3. Señales de Referencia en el enlace de subida

- *Uplink DeModulation Reference Signals (DM-RSs)*: A fin de que soporten transmisiones SU-MIMO de cuatro capas especiales, estas señales requieren multiplexarse en un determinado eNB. Así mismo, son precodificadas en el enlace de subida, usando para ello igual precodificación para la transmisión de los datos en el canal PUSCH.
- *Uplink Sounding Reference Signals (SRSs)*: Estas señales son relevantes, toda vez que permiten asignar recursos dinámicamente.

3.3. (CoMP) COORDINATED MULTIPOINT TRANSMISSION AND RECEPTION [13], [21], [36], [43] - [45]

La técnica coordinated multipoint resalta fundamentalmente en los siguientes criterios:

- Múltiples antenas de diferentes celdas son utilizadas, es decir, tanto las antenas de la celda que provee el servicio como de las celdas de las antenas contiguas, toda esta gestión mejora notablemente la calidad de la señal recibida por el equipo de usuario y el eNodeB; así como también, permite reducir la interferencia co-canal que producen las celdas vecinas.
- A fin de ofrecer un servicio de calidad y mejorar el uso de la red, un equipo de usuario puede recibir señales de múltiples eNB y viceversa cuando se quiera transmitir. Esto conlleva a que el usuario experimente un rendimiento óptimo y de calidad cuando accedan a videos, fotos, música, videoconferencia, entre otros múltiples servicios que demanden gran ancho de banda.
- Esta técnica a fin de aumentar la ganancia en los límites de una celda, permite en la recepción y transmisión del conjunto de estaciones base su coordinación dinámica, planificación, transmisión y procesamiento. En la Figura 58 se puede apreciar esta gestión conjunta entre dichas celdas.

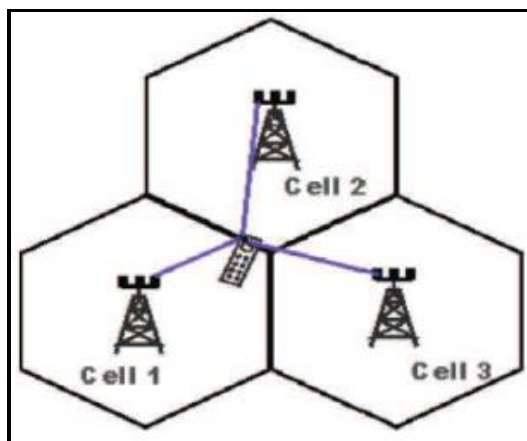


Figura 58: Coordinación de CoMP [13]

Las variantes de transmisión y recepción de CoMP son las siguientes:

- **Procesamiento conjunto (Joint processing):** Se efectúa al existir la coordinación en los diferentes eNBs, mismos que efectúan la transmisión y recepción de información hacia el equipo de usuario o viceversa.
- **Planificación coordinada – conformación de haz coordinado (Coordinated Scheduling – Coordinated Beamforming / CS-CB):** Se efectúa cuando un solo eNB se encuentra transmitiendo / recibiendo, para el efecto es relevante la comunicación entre los eNBs a fin de: planificar, intercambiar información de control y conformar los haces de radiación, permitiendo elegir la estación base que entrará en el proceso.

Las técnicas utilizadas por CoMP varían tanto para el enlace de bajada como el de subida, en los siguientes apartados se analizarán respectivamente.

3.3.1. Enlace de bajada en LTE CoMP

En el enlace de bajada existen dos formas de CoMP a fin de coordinar la transmisión entre diferentes eNBs hacia un equipo de usuario, que son:

- **Joint Processing:** De esta forma, los datos son transmitidos a un equipo de usuario al mismo tiempo de diferentes eNBs; lo que involucra la utilización de muchos recursos de red, toda vez que los datos deben pasar por cada eNB que participa en este proceso.
- **CS – CB:** De esta forma, los datos son transmitidos a un equipo de usuario por un único eNB. Su ventaja radica fundamentalmente en la utilización de menos recursos de red, toda vez que la transmisión es de uno a uno; y la comunicación entre los eNBs es a fin de planificar y conformar los haces.

3.3.2. Enlace de subida en LTE CoMP

En el enlace de subida existen dos formas de CoMP a fin de coordinar la recepción entre diferentes eNBs hacia un equipo de usuario, que son:

- **Joint reception:** A través de la combinación de antenas de diferentes eNBs, se conforma arreglos de antenas virtuales, a fin de que en los eNBs sus señales recibidas se procesen y combinen; contando así con la salida total de la señal. Este proceso conlleva a requerir de muchos datos que deben ser transferidos entre los eNBs.
- **CS:** A diferencia de la anterior técnica, esta no requiere de muchos datos que deben ser transferidos entre los eNBs, toda vez que se requiere únicamente la coordinación de las decisiones entre los eNBs para minimizar las interferencias.

3.4. RELAYING [13], [21], [36], [46] - [49]

En LTE-A es una característica que fundamentalmente es basada en la utilización de *RNs*, complementando las macro-celdas y efectuándose el incremento tanto de la capacidad de la red como de su cobertura.

Un *Relay Node* está conectado a un eNB fuente de manera inalámbrica, conocido como *donor eNB*. Entre las funcionalidades principales podemos destacar las siguientes:

- Procesa la señal recibida antes de reenviarla.
- Existen funcionalidades compartidas con las de un eNB, por ejemplo: control remoto y monitoreo.
- Cuentan con dos fases de transmisión entregando la señal recibida del *donor eNB* al equipo de usuario.

En la Figura 59 se puede apreciar la arquitectura de *relaying*:

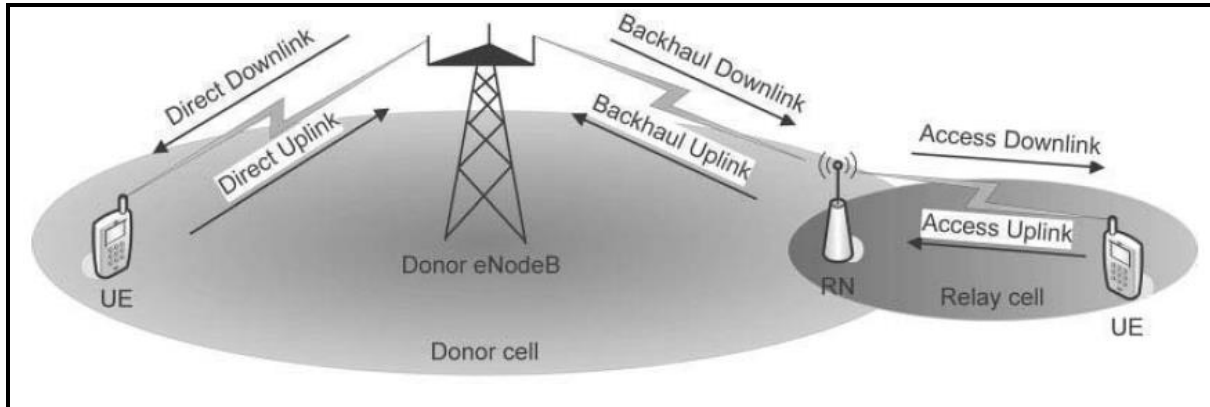


Figura 59: Enlaces y elementos de Relaying [21]

A continuación, se procederá a analizar todos los elementos y enlaces que componen la arquitectura de *relaying*:

- *Direct link (downlink- uplink)*: Es el enlace que existe entre el *UE* y el *donor eNB* y viceversa.
- *Donor eNodeB*: Es un *eNB* fuente que permite la comunicación con los elementos *RNs* y los *UEs* mediante los enlaces *backhaul* y *direct link* respectivamente.
- *Donor cell*: Representa al perímetro de cobertura determinada por el *donor eNB*.
- *Backhaul link (downlink – uplink)*: Es el enlace que existe entre el *RN* y *donor eNB*; y viceversa.
- *Relay cell*: Representa al área de cobertura determinada por el *RN*.
- *Access link (downlink – uplink)*: Es el enlace entre el *UE* y el *RN* y viceversa.

Existen los siguientes términos cuando hablamos de *relay nodes*:

- *RN Inband – outband*: Puede ser la misma o diferentes la frecuencia de portadora en el *Access link* y en el *backhaul link*, en cuyo caso si es la misma se habla de *RN inband* y si es diferentes se habla de *RN outband*.
- *RN Half – full duplex*: Al *RN* que únicamente se limita a recibir o a transmitir información desde o hacia el *backhaul link* o al *Access link* respectivamente, se le nomina *RN half duplex*. Así mismo, al *RN* que recibe y transmite simultáneamente la información se le conoce como *full dúplex*.

3.4.1. Escenarios de Despliegue

Los escenarios de despliegue donde son utilizados los *RNs* son los siguientes:

- ***Ampliación de la cobertura de la celda en zonas rurales:*** Debido a las potencias con las que cuenta los *RNs*, de aproximadamente 46dBm, éstos pueden ser utilizados para cubrir zonas rurales. Los *RNs* son idóneos para redes 3G, ofreciendo la misma cobertura de dichas redes y manteniendo la cantidad de estaciones base.
- ***En ambientes outdoor urbanos y suburbanos:*** Este escenario se enfoca principalmente en ciertas áreas dedicadas den una celda. Es así que, se utiliza una potencia de 30 dBm o menores para entornos urbanos y 37dBm aproximadamente para entornos suburbanos.
- ***Mejora de la cobertura en ambientes internos:*** Este escenario se enfoca al interior de edificios a fin de brindar a los usuarios una cobertura de calidad. Al tratarse de un escenario interno, la potencia debe ser baja para su transmisión a fin mitigar percances de interferencia.
- ***Escenarios de puntos muertos:*** Este escenario se encarga de solventar los problemas donde no llega la señal, debido a diferentes tipos de obstáculos como lo son la infraestructura de las edificaciones. Para llegar con este servicio, el *RN* se ubica en línea de vista con el *donor eNodeB* a fin de que se encargue de radiar a dichos puntos objetivo.
- ***Despliegues de corto tiempo:*** Ideales para escenarios que por su naturaleza tienen un periodo por corto tiempo, como ejemplo se puede citar los siguientes eventos: eventos públicos, juegos deportivos, entre otros.
- ***Movilidad en grupo:*** Ideales para escenarios de movilidad, como por ejemplo se puede citar: trenes, buses, barcos entre otros. En el vehículo el *RN* es ubicado a fin de que éste se conecte al *donor eNodeB* idóneo conforme el vehículo mantenga su movimiento. Este proceso implica como

ventaja fundamental el ahorro de la batería del equipo de usuario toda vez que se reduce la potencia de transmisión de los *RNs*.

3.4.2. Tipos de Relay Nodes

Los tipos de *Relay Nodes* en LTE-A son:

- ***RNs type 1, 1a y 1b:*** Se encargan fundamentalmente de la transmisión de: señales de sincronización como PSS – SSS; así como también canales de datos y control. Mediante el canal PDCCH del RN los equipos de usuario reciben información de planificación; y, así mismo, remiten información sobre el estado del canal. Los RNs son diferenciados por:
 - *RNs type 1:* Encargados de la transmisión *half dúplex inband*.
 - *RNs type 1a:* Tiene las mismas propiedades de *RNs type 1*, encargados adicionalmente de la transmisión *outband full dúplex*.
 - *RNs type 1b:* Encargados de la transmisión *inband full dúplex*.
- ***RNs type 2:*** Se encargan fundamentalmente de la transmisión del canal PDSCH. Al no transmitir canales de control, no pueden ser identificados por los equipos de usuario. En este escenario, el eNB es el encargado de realizar toda la planificación.

3.5. CONCLUSIÓN

Se ha estudiado a la tecnología Long Term Evolution Advanced – LTE Advanced, resaltando que, debido a las características mejoradas agregadas a LTE Advanced versión 8, éste ha cumplido con las especificaciones técnicas definidas por IMT-Advanced, siendo una tecnología 4G. Esto obedece principalmente, a la capacidad de transmisión que supera los 100 MHz, eficiencia espectral extremadamente alto, funcionamiento con canales de radio que superan los 40 MHz, transmisiones coordinadas multipunto entre otros.

CAPÍTULO 4

TECNOLOGÍA LONG TERM EVOLUTION – LTE VS LTE ADVANCED

4.1. INTRODUCCIÓN

Una vez analizadas y estudiadas las tecnologías LTE y LTE-A en los capítulos 2 y 3 respectivamente, se procederá a realizar un análisis comparativo entre estas dos tecnologías, abarcando en los siguientes temas: tecnológica, bandas de frecuencia, arquitectura de red, capa física, esquemas de modulación, velocidad de transmisión y la eficiencia espectral, técnicas de múltiples antenas, categorías de equipos de usuario, servicios y aplicaciones; y, redes desplegadas y lanzamiento comercial.

4.2. COMPARACIÓN TECNOLÓGICA ^{[13], [21], [36], [50] - [51]}

La tecnología LTE-Advanced es la evolución de LTE, mejorando notablemente la velocidad de transmisión. Para ello, se ha visto en la necesidad de utilizar técnicas tales como: CoMP, agregación de portadora, relaying y sistemas de transmisión de múltiples antenas; a fin de mejorar todo el sistema, manteniendo la estructura inicial de sus bases con la que fue creado.

En la Tabla 3 se procederá a comparar los parámetros principales entre las tecnologías LTE y LTE-A:

Tabla 3: Comparación ámbito general de LTE vs LTE-A [51]

Parámetro			LTE	LTE-Advanced	
Eficiencia espectral	Pico [bps/Hz]	DL	15	30	8x8 SU-MIMO
		UL	3.75	15	4x4 SU-MIMO
	Promedio [bps/Hz]	DL	1.87	3.7	CoMP, MIMO
		UL	1	2	CoMP, MIMO
	Borde de la celda [bps/Hz]	DL	0.06 (MIMO 4X2)	0.12 (MIMO 4X4)	CoMP, MIMO
		UL	0.03 (MIMO 2X4)	0.07 (MIMO 2X4)	CoMP, MIMO

Velocidad de transmisión pico	DL	300 Mbps (MU-MIMO 4x4, 64QAM, 20 MHz)	1.2 Gbps (SU-MIMO 8X8, 64 QAM, 2 CCs 40 MHz)	Agregación de portadora, MIMO
	UL	75 Mbps (MU-MIMO 4x4, 64 QAM, 20 MHz)	600 Mbps (SU-MIMO 4X4, 64 QAM, 2 CCs 40 MHz)	
Ancho de banda soportado		Hasta 20 MHz (1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz)	Hasta 100 MHz	Agregación de portadora
Latencia en el plano de usuario		<30 ms	< 10 ms	
Latencia en el plano de control		<100 ms	< 50 ms	
Movilidad		Optimizado para bajas velocidades (< 15 km/h) hasta los 120 km/h. Los enlaces se mantienen hasta velocidades de 350 km/h.	Optimizado para bajas velocidades (< 15 km/h) hasta los 120 km/h. Los enlaces se mantienen hasta velocidades de 350 km/h.	
Radio de cobertura de una celda (caso de estudio)		5 km	5 km	
Número de usuarios en una celda		200 usuarios activos por celda en 5 MHz	600 usuarios activos por celda en 5 MHz	

A continuación, se procederá a explicar los parámetros expuestos:

- *Referente a movilidad:* A fin de conseguir la eficiencia y velocidad de transmisión expuesta, es necesario que los usuarios se transporten a una velocidad por debajo de los 15 km/h. A mayor velocidad de movilización de los usuarios el acceso a la red se mantendrá hasta los 350 km/h bajo condiciones no favorables, presentándose problemas en la comunicación.
- *Referente al radio de cobertura:* Como caso de estudio, se considera el radio de cobertura de 5 km. Es decir, ambas tecnologías cuentan con celdas que cuentan con radios que cubren entre 1 a 35 km, mismos que son utilizados para diferentes ámbitos dependiendo de las necesidades, tales como zonas:

urbanas, rurales y carreteras. Del caso de estudio citado con un ancho de banda de 5MHz, se cuenta alrededor de 200 usuarios activos en una celda, mientras se triplica para LTE-Advanced.

- *Referente a la latencia:* Previo a explicar este apartado, es necesario mencionar que la latencia para ambos planos: usuario y de control, representan la sumatoria de los retardos efectuados por el retraso en la transmisión de los paquetes, propagación y su procesamiento de la entidad de red respectiva. Mientras la latencia en el plano de usuario se ve reflejada en la conexión de extremo a extremo, en el plano de control se ve reflejada en el control para establecer los servicios portadores. De los valores expuestos en la Tabla 3 de ambas tecnologías, se concluye que LTE Advanced es más eficiente y veloz que LTE.
- *Referente a la velocidad de transmisión:* Utilizando 64 QAM y 20 MHz de ancho de banda, LTE alcanza una velocidad en el enlace de bajada alrededor de 300 Mbps dada la parametrización MU-MIMO 4x4; mientras que en el enlace de subida llega a 75 Mbps con la parametrización idéntica al enlace de bajada.

Así mismo, utilizando 64 QAM en LTE Advanced alcanza una velocidad en el enlace de bajada de 1.2 Gbps aplicando la siguiente parametrización: agregación de portadora de 2 componentes de 20 MHz y SU-MIMO 8x8; obteniendo 40 MHz en total del ancho de banda por cada una. En el enlace de subida el ancho de banda es igual al de LTE, alcanzando así 600 Mbps de velocidad de transmisión dada la parametrización SU-MIMO 4x4.

- *Referente a la eficiencia espectral:* Los tipos de eficiencia espectral expuestas, se debe destacar que: el pico es obtenida de la operación matemática de la división entre la velocidad de transmisión y el ancho de banda; siendo 20 MHz para LTE y 40 MHz para LTE Advanced. Referente a la eficiencia espectral tanto para el promedio como para el borde de la celda, estos valores son obtenidos considerando escenarios reales.

4.3. COMPARACIÓN DE BANDAS DE FRECUENCIA [13], [21], [36], [52] - [58], [61]

Como se analizó en apartados previos, las bandas de frecuencias utilizadas por ambas tecnologías: estas heredan de tecnologías predecesoras tales como las tecnologías 3G. LTE Advanced cuenta con nuevas bandas dado el uso de más espectro que particulariza a esta tecnología; dichas bandas adicionales son especificadas por IMT-Advanced.

En la Tabla 4 se puede apreciar las bandas de frecuencia asignadas para ambas tecnologías.

Tabla 4: Bandas de frecuencia [61]

Band	Name	Downlink (MHz)			Bandwidth DL/UL (MHz)	Uplink (MHz)			Duplex spacing (MHz)	Geographical area
		Low	Middle	High		Low	Middle	High		
1	2100	2110	2140	2170	60	1920	1950	1980	190	All
2	1900 PCS	1930	1960	1990	60	1850	1880	1910	80	NAR
3	1800+	1805	1842.5	1880	75	1710	1747.5	1785	95	All
4	AWS-1	2110	2132.5	2155	45	1710	1732.5	1755	400	NAR
5	850	869	881.5	894	25	824	836.5	849	45	NAR
6	UMTS only	875	880	885	10	830	835	840	45	APAC
7	2600	2620	2655	2690	70	2500	2535	2570	120	EMEA
8	900 GSM	925	942.5	960	35	880	897.5	915	45	All
9	1800	1844.9	1862.4	1879.9	35	1749.9	1767.4	1784.9	95	APAC
10	AWS-1+	2110	2140	2170	60	1710	1740	1770	400	NAR
11	1500 Lower	1475.9	1485.9	1495.9	20	1427.9	1437.9	1447.9	48	Japan
12	700 a	729	737.5	746	17	699	707.5	716	30	NAR
13	700 c	746	751	756	10	777	782	787	-31	NAR
14	700 PS	758	763	768	10	788	793	798	-30	NAR
17	700 b	734	740	746	12	704	710	716	30	NAR
18	800 Lower	860	867.5	875	15	815	822.5	830	45	Japan
19	800 Upper	875	882.5	890	15	830	837.5	845	45	Japan
20	800 DD	791	806	821	30	832	847	862	-41	EMEA
21	1500 Upper	1495.9	1503.4	1510.9	15	1447.9	1455.4	1462.9	48	Japan
22	3500	3510	3550	3590	80	3410	3450	3490	100	EMEA
23	2000 S-band	2180	2190	2200	20	2000	2010	2020	180	NAR
24	1600 L-band	1525	1542	1559	34	1626.5	1643.5	1660.5	-101.5	NAR
25	1900+	1930	1962.5	1995	65	1850	1882.5	1915	80	NAR

26	850+	859	876.5	894	35	814	831.5	849	45	NAR
27	800 SMR	852	860.5	869	17	807	815.5	824	45	NAR
28	700 APT	758	780.5	803	45	703	725.5	748	55	APAC
29	700 d	717	722.5	728	11	Downlink only				NAR
30	2300 WCS	2350	2355	2360	10	2305	2310	2315	45	NAR
31	450	462.5	465	467.5	5	452.5	455	457.5	10	EALA
32	1500 L-band	1452	1474	1496	44	Downlink only				EMEA
65	2100+	2110	2155	2200	90	1920	1965	2010	190	All
66	AWS-3	2110	2155	2200	90 / 70	1710	1745	1780	400	NAR
67	700 EU	738	748	758	20	Downlink only				EMEA
68	700 ME	753	768	783	30	698	713	728	55	EMEA
252	Unlicensed NII-1	5150	5200	5250	100	Downlink only				All
255	Unlicensed NII-3	5725	5787.5	5850	125	Downlink only				All
TDD										
33	TD 1900	1900	1910	1920	20					EMEA
34	TD 2000	2010	2017.5	2025	15					EMEA
35	TD PCS Lower	1850	1880	1910	60					NAR
36	TD PCS Upper	1930	1960	1990	60					NAR
37	TD PCS Center gap	1910	1920	1930	20					NAR
38	TD 2600	2570	2595	2620	50					EMEA
39	TD 1900+	1880	1900	1920	40					China
40	TD 2300	2300	2350	2400	100					China
41	TD 2500	2496	2593	2690	194					All
42	TD 3500	3400	3500	3600	200					
43	TD 3700	3600	3700	3800	200					
44	TD 700	703	753	803	100					APAC
45	TD 1500	1447	1457	1467	20					China
46	TD Unlicensed	5150	5537.5	5925	775					All

APAC	Asia and Pacific
APT	Asia Pacific Telecommunity
CALA	Central America Latin America
DD	Digital Dividend
EMEA	Europe Middle East and Africa
EU	Europe
ME	Middle East
NAR	North America Region
PS	Public Safety
U-NII	Unlicensed National Information Infrastructure

De la tabla expuesta, podemos analizar que:

- En virtud que operan en las mismas bandas de frecuencia, LTE y LTE Advanced son compatibles.
- LTE tiene como ventaja trabajar bajo anchos de bandas variables, beneficiando al operador, toda vez que dependiendo de la tarifa elegida por los usuarios, se asignarán más o menos recursos. No obstante, la banda de frecuencia más utilizada mundialmente es la banda FDD de 1800 MHz, ello obedece a la tendencia mayoritaria de redes UMTS que trabaja bajo esta banda.
- Se debe destacar que, para IMT-Advanced un requisito indispensable es que una tecnología 4G debe contar con un ancho de banda de 40 MHz. De la tabla expuesta, podemos apreciar que, de las bandas nuevas asignadas por FDD para LTE-Advanced los mayores son las bandas 22, 65, 66, 252 y 255, del otro lado, las bandas que trabajan bajo TDD los mayores son las bandas 41, 42, 43 y 46.
- Ambas tecnologías generalmente utilizan frecuencias bajas en zonas rurales, a fin de alcanzar grandes coberturas de banda ancha. Mientras que en zonas urbanas de alta densidad poblacional trabajan utilizando frecuencias altas. En países donde se encuentran previamente utilizando tecnologías como GSM y UMTS, aprovechan de éstas para implementar las tecnologías LTE y LTE – Advanced, optimizando costos en licencias de radio y utilizando dichas bandas. No obstante, al utilizar dichas bandas deberán contar con un espectro robusto, a fin de soportar el tráfico producido por las tecnologías GSM, UMTS, LTE y LTE – Advanced.

4.4. COMPARACIÓN DE LA ARQUITECTURA DE RED [13], [21], [36], [52] - [58]

La arquitectura de red de ambas tecnologías tanto LTE como LTE-Advanced, está compuesta como la analizada en el apartado 2.2, basándose específicamente en IP. En la Figura 60 se puede apreciar su arquitectura básica.

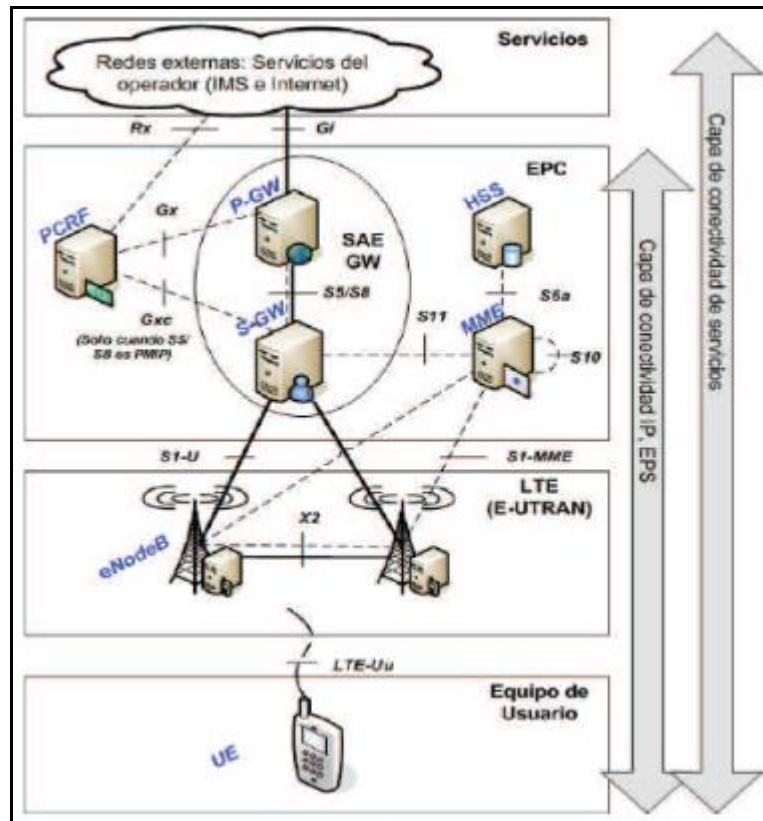


Figura 60: Arquitectura de red básica [13]

De esta figura, se puede realizar el siguiente análisis:

- Está compuesto básicamente por: nodos lógicos, interfaces y conexiones.
- Los eNBs constituyen elementos relevantes en la red E-UTRAN, toda vez que ejecutan procesos de gestión de la información, a fin de cumplir con una eficiente gestión de los recursos de radio disponible.
- Las conexiones que mantiene esta arquitectura son: desde el equipo de usuario hacia los eNBs utiliza la interfaz Uu, entre los eNBs utiliza la interfaz X2, y desde los eNBs hacia la EPC utiliza la interfaz S1.

- Se hace énfasis que ambas tecnologías soportan tráfico específicamente IP, para ello a través de su núcleo principal que viene a ser EPC, cuentan con elementos principales que permiten la movilización del usuario, siendo los siguientes: MME, S-GW y P-GW.
- Las conexiones de estos tres elementos principales se mantienen de la siguiente manera: Los eNBs se conectan con MME y S-GW mediante las interfaces S1-MME y S1-U respectivamente. Los dos gateways (S-GW y P-GW) conforman el SAE Gateway y son utilizados para los datos de usuario, permitiendo establecer la comunicación entre la red de acceso y las distintas redes.
- Mediante la interfaz Gi en conjunto con la entidad P-GW se conecta la EPC hacia redes externas tales como IMS e Internet. Las funciones principales de P-GW es asignar direcciones IP a los equipos de usuario, así como también de realizar el control de calidad QoS de las sesiones establecidas. Entre las entidades P-GW y S-GW se conectan mediante las interfaces S5 y S8, la S5 es utilizada para las dos entidades siempre y cuando formen parte de la misma operadora y S8 cuando pertenecen a diferentes operadoras proporcionando de esta manera el servicio de roaming.
- Las funciones principales de la entidad de red PCRF es mantener el control de los servicios portadores que brindan ambas tecnologías, entre ellas tenemos controlar:
 - Procesos de tarificación.
 - Argumentos y datos de QoS ligado a cada servicio portador.
 - Gestión del tráfico generado, entre otros.
- Otra de las funciones de la entidad PCRF es a través de la interfaz Gx, siendo en los servicios portadores la gestión de su velocidad de transmisión. A través de la interfaz Rx se puede acceder desde redes externa hacia la

entidad PCRF, la funcionalidad principal de dicha interfaz es permitir a los servidores de aplicación externos proporcionen información relacionada a los servicios que tiene acceso el usuario y el QoS que éstos conllevan.

- MME se conecta con las entidades S-GW y HSS mediante las interfaces S11 y S6a respectivamente, a fin de consultar información de aquellos usuarios que cuentan con autorización a fin de efectuar conexiones mediante E-UTRAN. La comunicación entre entidades MME se lo efectúa a través de la interfaz S10.
- La arquitectura de red para ambas tecnologías se puede separar en dos capas que son:
 - Primera capa: Denominada también capa de conectividad IP, involucra a los elementos e interfaces encargados de la conectividad IP, constituida por: E-UTRAN, EPC y el equipo de usuario.
 - Segunda capa: Está constituida por la primera capa y el bloque de servicios, enfocada a la conectividad de servicios.

Una vez analizada la arquitectura de red de ambas tecnologías, se determina que la principal diferencia que radica entre estas tecnologías es los procedimientos y métodos aplicados en E-UTRAN.

LTE utiliza fijamente el ancho de banda en cualquier banda de operación, alcanzando hasta 20 MHz, mientras que en LTE – A hace uso del ancho de banda mediante varias bandas de frecuencias logrando alcanzar 100 MHz, siendo como límite total de 5 portadoras cada una de ellas con 20 MHz.

Mientras en LTE se mantiene constante el QoS toda vez que al ser asignada la misma banda de frecuencia, éstas dependen del ambiente donde se encuentra el equipo de usuario y de las condiciones de radio, en LTE – A existe una calidad de

servicio QoS superior a LTE, toda vez que al contar con una variedad de bandas de frecuencia en diferentes lugares del espectro radioeléctrico, se constituye en un sistema inteligente, quien frente a las situaciones que presente el usuario hará uso de subportadoras de diferentes bandas a fin de ofrecer calidad en el servicio.

A fin de aumentar la capacidad, rendimiento y su cobertura, LTE - Advanced a diferencia de LTE agrega un elemento llamado Relay Node dentro de E-UTRAN, cuyas principales funcionalidades son similares a las eNBs. En la Figura 61 se puede apreciar la topología de red que incorpora el elemento relay node.

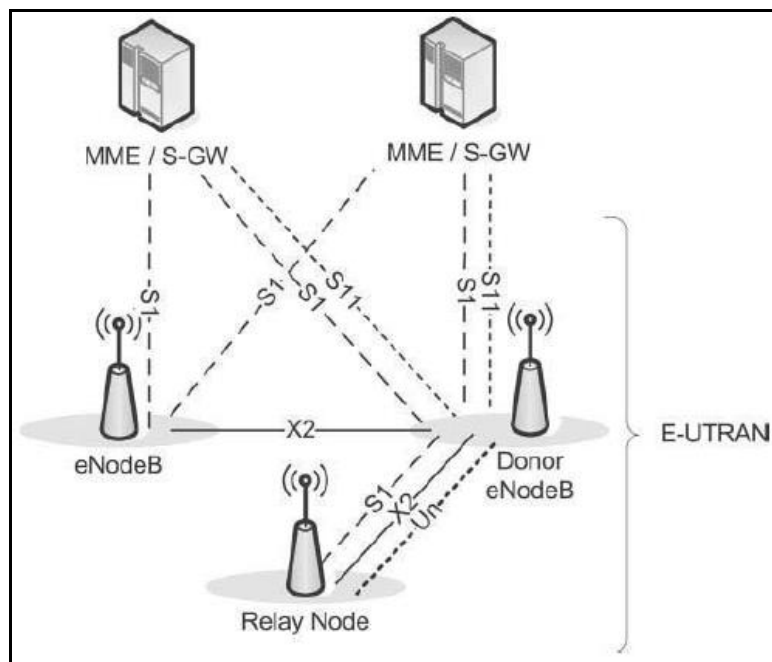


Figura 61: Topología de red que incorpora el elemento Relay Node [21]

- PLANO DE USUARIO Y PLANO DE CONTROL

Los protocolos en EPC y E-UTRAN tanto en LTE como en LTE – A, se basan en los planos de: control y usuario. Este último se caracteriza por enviar paquetes IP de usuario, mientras que el de control se caracteriza por administrar y controlar las distintas interfaces.

En la Figura 62 se puede apreciar los protocolos que son utilizados en el plano de usuario mediante la red.

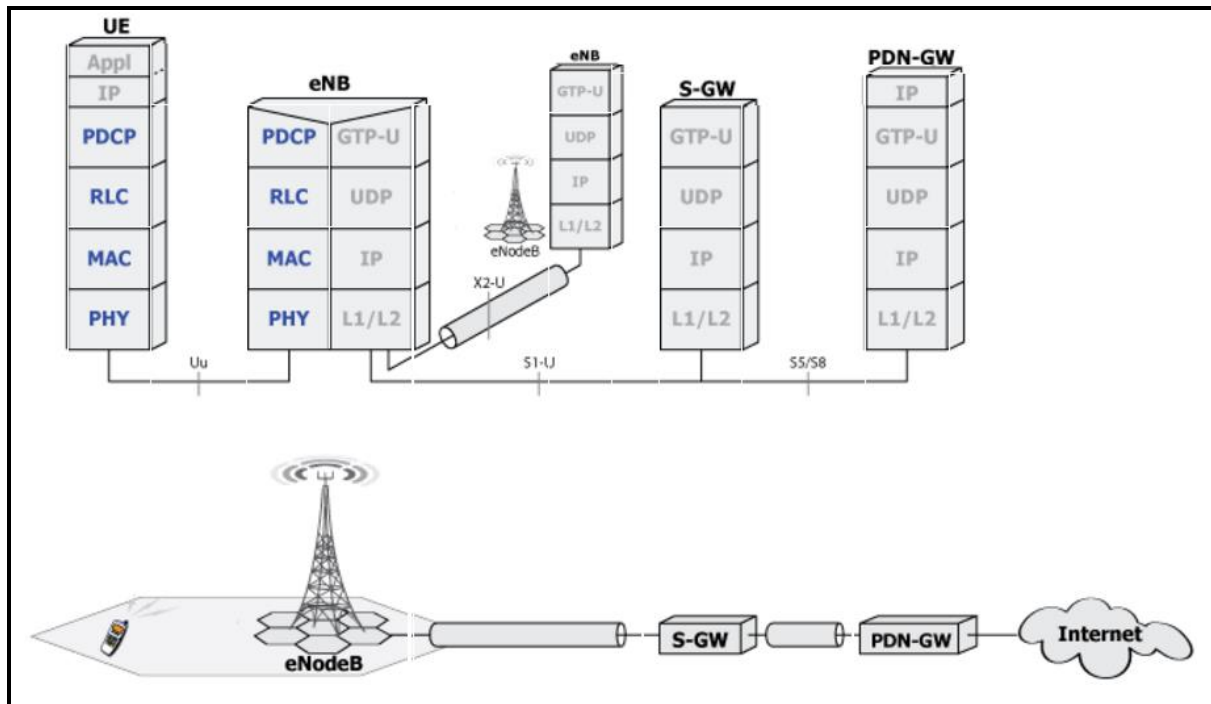


Figura 62: Protocolos del plan de usuario [21]

Se puede visualizar que, en las diferentes interfaces actúan los diferentes tipos de protocolos, mismos que admiten a las entidades establecer comunicación. Los protocolos resaltados en color azul (PDCP, RLC, MAC, PHY), son los únicos que difieren del resto de interfaces, y permiten la comunicación entre el equipo de usuario y los eNBs; mientras que, los protocolos resaltados de color gris (GTP-U, UDP, IP y L1 / L2) son utilizados por las interfaces: S5/S8, X2-U, S1-U, a fin de mantener la comunicación entre E-UTRAN y EPC, al igual que las entidades de S-GW y P-GW.

En la Figura 63 se puede apreciar los protocolos utilizados en el plano de control; así como su correspondiente señalización de los diferentes elementos de ambas tecnologías correspondientes a E-UTRAN y EPC.

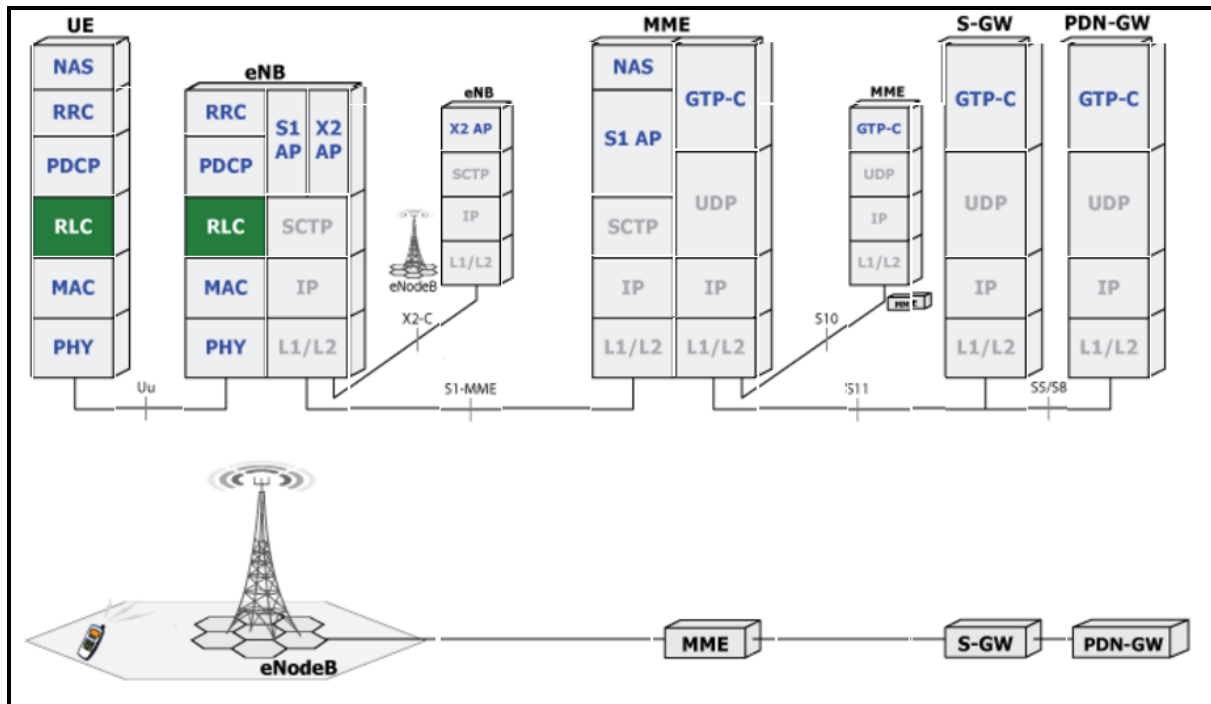


Figura 63: Protocolos del plan de control [21]

Como se puede apreciar, en el plan de control existen nuevos protocolos que el plan de usuario. En el caso del equipo del UE cuentan con los protocolos NAS y RRC adicionales. Así mismo, en el eNB cuenta con el protocolo RRC adicional. La comunicación entre eNBs se realiza a través de los protocolos X2 AP y SCTP, mientras que el protocolo S1 AP es utilizado para la comunicación entre el MME y eNB mediante la interfaz SI-MME. Para finalizar, el protocolo GTP-C es usado por las interfaces S5/S8, S10 y S11; así como también por P-GW y S-GW que son entidades de red.

De las figuras 62 y 63, se puede realizar el siguiente análisis:

- En ambos planos de: usuario y control en el UE y eNB se utilizan los siguientes protocolos: PHY, PDCP, MAC y RLC.
- En ambos planos de: usuario y control, los paquetes del protocolo GTP-C se encapsulan en IP y UDP.
- La función principal del protocolo NAS del plano de control es establecer normas que permitan comunicarse entre el MME y el UE; es decir, el objetivo final es contar con una gestión eficiente entre EPC y E-UTRAN de extremo a extremo.

- Mediante el protocolo X2 AP se realiza la gestión del evento a fin de que se efectúe el cambio de celda por un determinado usuario, éste protocolo es quien notifica a toda la plataforma que un usuario se halla en otro eNB.
- Los protocolos para las gestiones de: sesiones y movilidad definidas por el plano de control son: SCTP, RRC, S1AP, NAS, X2 AP y GTP-C.
- El protocolo PMIPv6 del plano de control puede ser utilizado sustituyendo al protocolo GTP-C, mientras que el protocolo GRE del plano de usuario puede ser utilizado sustituyendo al protocolo GTP-U.

En el apartado anterior se efectuó el análisis correspondiente en lo que refiere a la arquitectura de red de ambas tecnologías, haciendo énfasis la incorporación de la topología relay en LTE Advanced. En las siguientes figuras, podemos apreciar los protocolos de los planos: usuario y control, que son utilizados por parte de la topología citada.

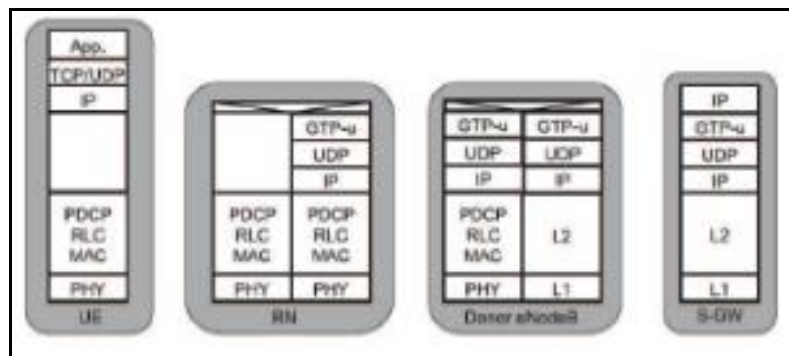


Figura 64: Plano de usuario de una topología relay para LTE – Advanced [21]

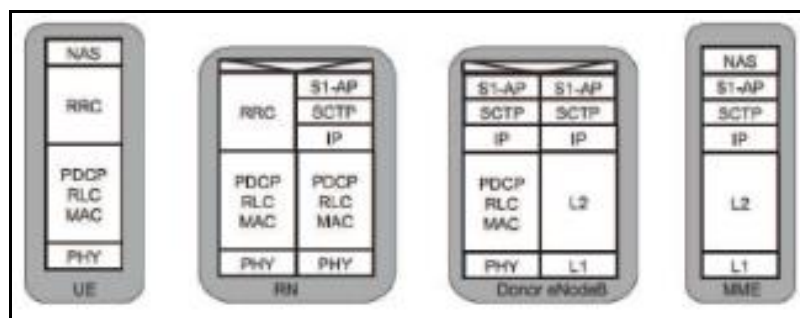
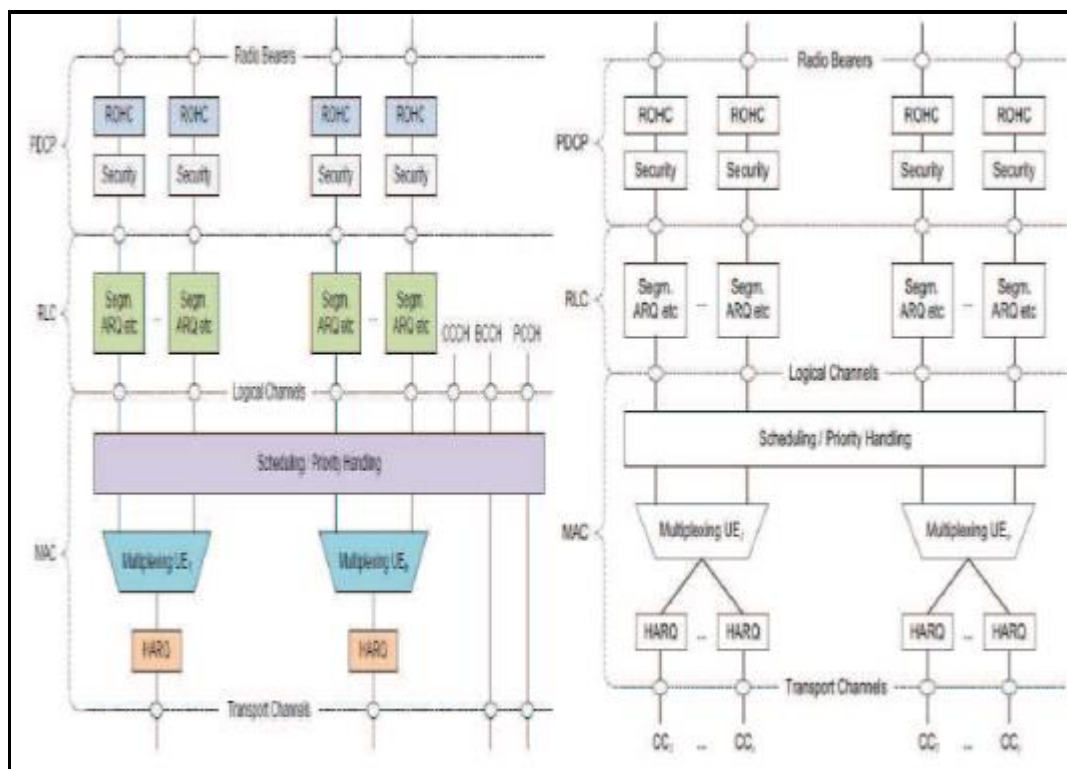


Figura 65: Plano de control de una topología relay para LTE – Advanced [21]

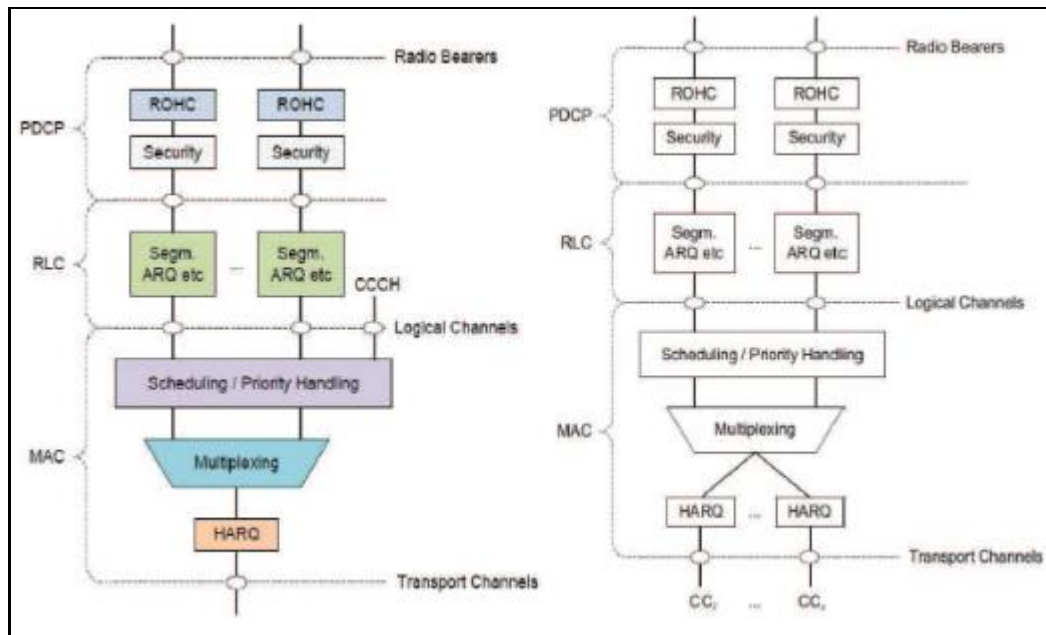
La tecnología LTE – Advanced se caracteriza fundamentalmente por la técnica de agregación de portadoras, en las siguientes figuras se puede apreciar dicha característica.



a) LTE

b) LTE – Advanced

Figura 66: Plano de usuario de LTE y LTE – Advanced para el downlink [21]



a) LTE

b) LTE – Advanced

Figura 67: Plano de usuario de LTE y LTE – Advanced para el uplink [21]

Estas figuras nos facilitan el comparar la estructura del plano de usuario en lo que refiere a la capa dos, donde encontramos los siguientes protocolos: RLC, PDCP y MAC. Se concluye que tanto en el enlace de subida como en el de bajada la diferencia principal en ambas tecnologías radica en la capa MAC.

Así mismo, la información en LTE – A es factible su transmisión por medio de varios CC, significando que en la capa MAC utiliza de forma independiente un bloque de HARQ por componentes de portadora - CC para cada equipo de usuario; mientras que en LTE, se hace uso de una sola CC trabajando solo con un bloque de HARQ por un equipo de usuario.

Referente al plano de control en su estructura carece de diferencias en ambas tecnologías.

4.5. COMPARACIÓN DE LA CAPA FÍSICA [13], [21], [36], [52] - [58]

Fundamentándose en el diseño de multiplexación planteado por OFDM, tanto LTE como LTE – Advanced hacen uso de OFDMA a fin de establecer comunicación en el enlace de bajada.

En la Figura 68 se puede apreciar el esquema de transmisión efectuado por OFDM.

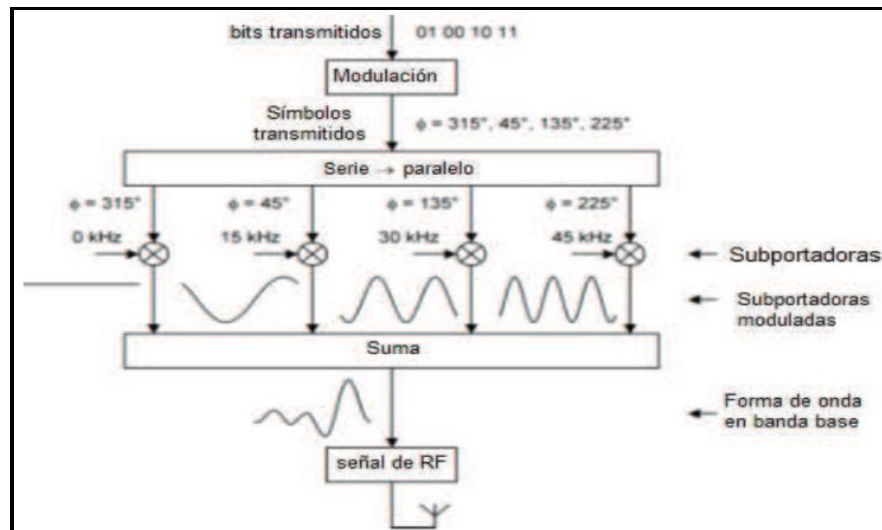


Figura 68: Esquema de transmisión OFDM [52]

De esta figura se cita como ejemplo que los bits a ser transmitidos han sido divididos en grupos de dos, mismos que ingresan a la modulación que para este caso es QPSK y posteriormente pasan por el bloque que les convierte de serie a paralelo. Estos símbolos se mezclan con las subportadoras, y conforme lo establece LTE y LTE – A, el espaciamiento es de 15 KHz entre subportadoras; en la figura arriba expuesta se refleja que las frecuencias van desde 0 hasta 45 KHz. Es así que los 4 bits a ser transmitidos son representados por las ondas, mismas que al añadirse conforman una única onda en el dominio del tiempo.

En la Figura 69 se puede apreciar el esquema de transmisión OFDMA utilizado por ambas tecnologías en base al diagrama de bloques.

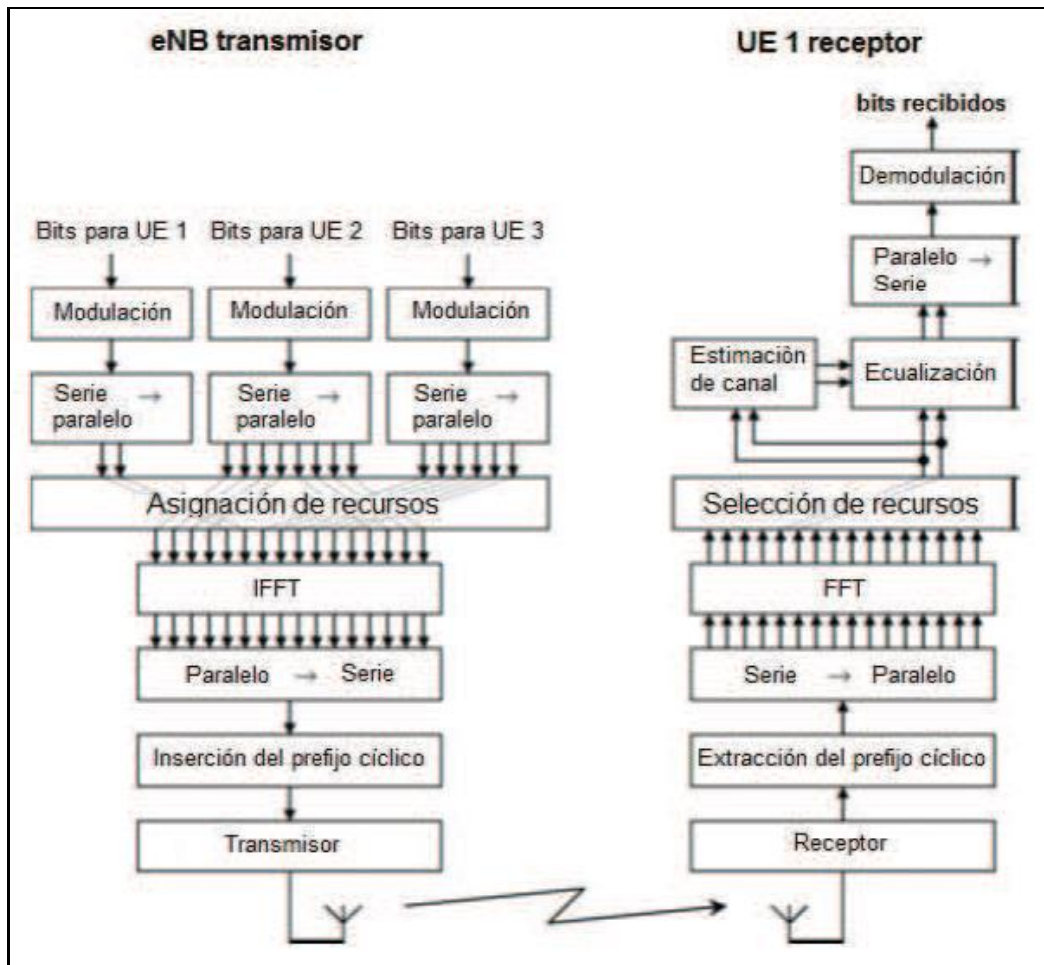


Figura 69: Esquema de transmisión OFDMA [52]

En la figura arriba señalada refleja que el transmisor es un eNB y está ofreciendo el servicio a tres equipos de usuario. Se observa que los bits son ingresados a la modulación y posteriormente a un conversor se serie a paralelo. Luego se efectúa la asignación de recursos por cada usuario basándose en la cantidad de subportadoras, seguidamente continúa con Inverse FFT mismo que crea una forma de onda digital, para convertirse posteriormente en forma analógica y finalmente ésta filtrarse y mezclarse con una frecuencia radio para efectuarse la transmisión.

Para el caso del receptor, el proceso es el opuesto del detallado en el apartado anterior. Lo que realmente diferencia en trabajar ya sea en LTE o LTE – A es en la estrategia de asignar los recursos, toda vez que la asignación difiere dependiendo del servicio que se esté ofreciendo, como por ejemplo VoIP o reproducción de video en HD.

Particularmente en LTE la forma como se asignan las portadoras están directamente relacionadas con el tipo de aplicación que utilizan, toda vez que al contar con el ancho de banda único el total de portadoras va a ser fijo; no así en LTE – A, ya que al contar con mayor ancho de banda permitirá asignar más subportadoras a los usuarios; tomando en cuenta también que tiene un plus adicional que es la asignación de subportadoras de otras bandas de frecuencia, conllevando a la calidad de transmisión que se proporciona al usuario.

La utilización de OFDMA para LTE y LTE – Advanced disminuye la interferencia inter símbolos toda vez que se transmiten los datos sobre varias subportadoras, no obstante, debido a los estados del canal radio y las alteraciones que podrían suscitarse en dichas señales al transitar por el espacio así como su desvanecimiento; la utilización del prefijo cíclico se convierte en un factor determinante que contrarresta los problemas mencionados; evitando errores de lectura de los datos recibidos por parte del receptor.

En el enlace de bajada, LTE utiliza SC-FDMA, mientras que en LTE – Advanced utiliza clustered SC-FDMA debido a la ventaja de la agregación de portadoras con las que cuenta. Clustered SC – FDMA también se le conoce como DFT-S-OFDMA y su principal ventaja sobre SC-FDMA radica en la utilización de conjuntos de subportadoras no contiguas pertenecientes a diferentes componentes de portadora.

Bajo el análisis expuesto en el apartado anterior, concluimos que LTE – Advanced cuenta con una amplia ventaja sobre LTE, toda vez que no se ve limitada al uso de subportadoras contiguas debido al uso de clustered SC-FDMA, permitiendo así una eficiente gestión de recursos tanto en la frecuencia selectiva como en el incremento en el rendimiento del enlace.

En la Figura 70 podemos visualizar como funciona SC-FDMA y clustered SC-FDMA en el enlace de bajada.

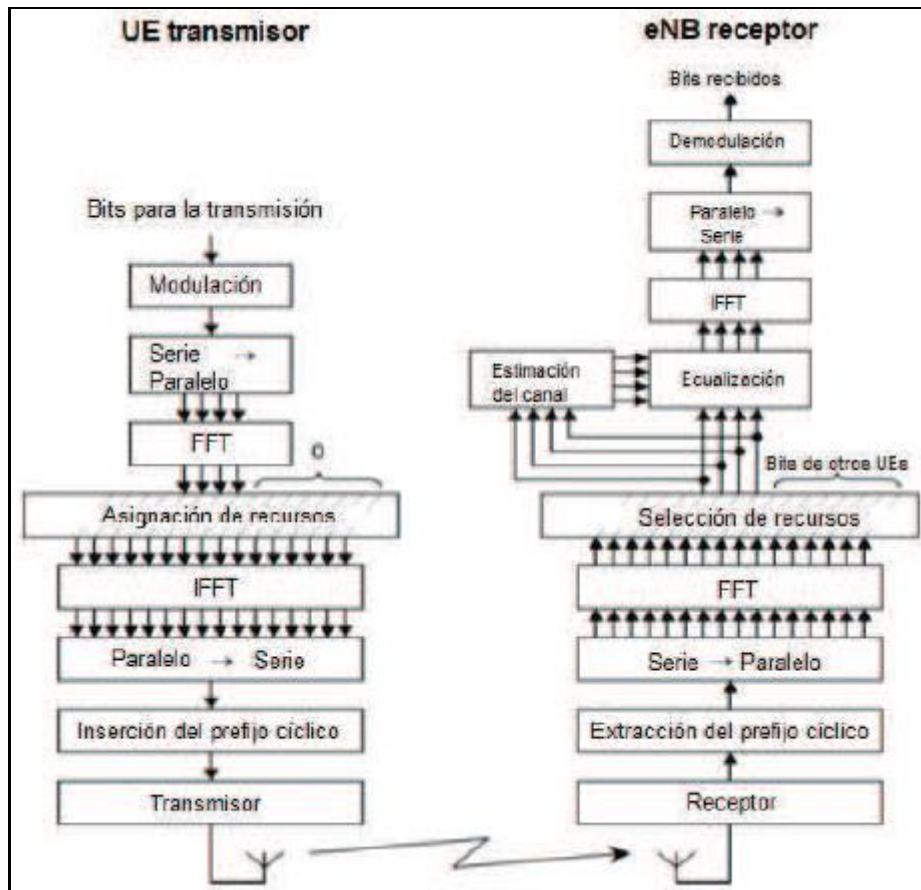


Figura 70: Esquema de transmisión SC-FDMA [52]

De la figura arriba expuesta, se puede analizar que el procedimiento es similar al del OFDM en recepción y transmisión, variando únicamente en que el receptor es el eNB y el transmisor es el equipo de usuario.

Utilizando la transformada discreta de Fourier – Forward FF, es viable la conversión de los símbolos de dominios de tiempo a frecuencia, ejecutado este proceso se asignan al ancho de banda del canal, previo a que se conviertan nuevamente al dominio del tiempo utilizando para ello Inverse FFT, y para culminar es insertado el prefijo cíclico. Para el proceso de recepción, éste se ejecuta de manera inversa a lo detallado.

4.6. COMPARACIÓN DE LOS ESQUEMAS DE MODULACIÓN [13], [21], [36], [52] - [58]

Tanto LTE como LTE – Advanced utilizan los siguientes esquemas de modulación: 64QAM, 16QAM, QPSK y BPSK. En la Figura 71 se puede apreciar los esquemas mencionados.

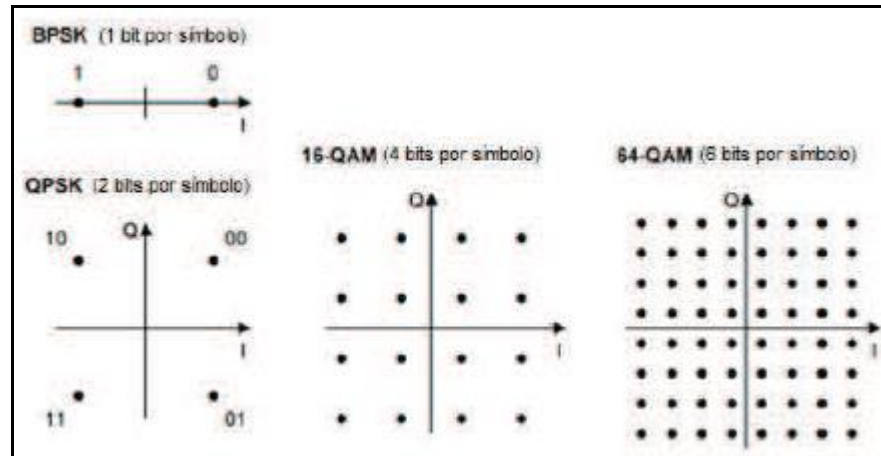


Figura 71: Esquemas de modulación utilizados por LTE y LTE – Advanced [52]

A continuación, se procederá a realizar el análisis correspondiente de los diferentes esquemas de modulación mencionados:

- **BPSK:** Se caracteriza por enviar bits de uno en uno, para ello utiliza señales de amplitud +1 y -1 o a su vez fases de 0° y 180° .
- **QPSK:** envía bits dos a la vez, para ello utiliza cuatro estados, dichas fases son: 45° , 135° , 225° y 315° produciéndose la combinación de bits que son: 00, 10, 11 y 01 respectivamente. Los estados mencionados son representados en un diagrama de constelación, tal como se lo expone en la Figura 72.

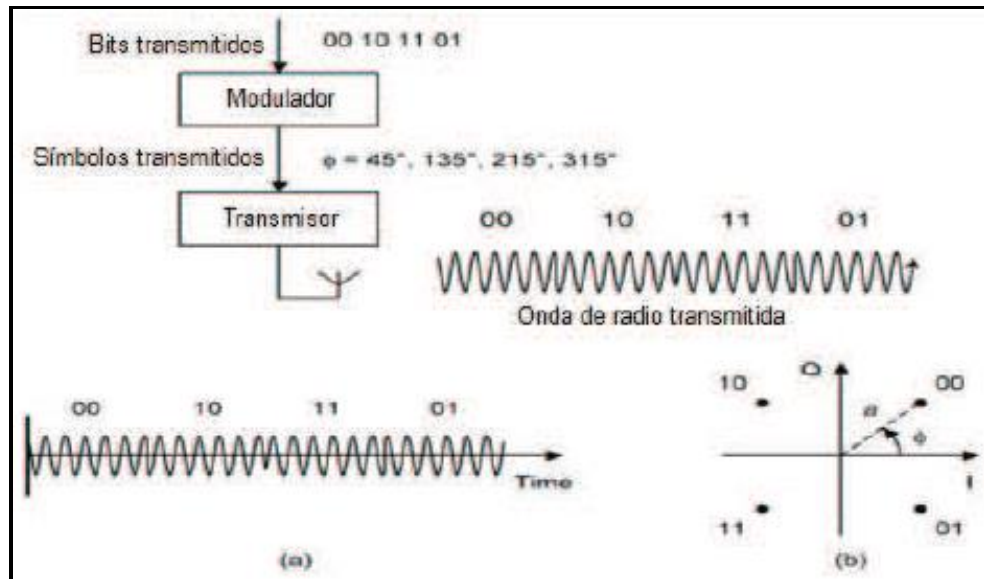


Figura 72: (a) Forma de onda QPSK. (b) Diagrama de constelación QPSK [52]

Se puede mencionar que el distanciamiento existente entre cada estado al origen constituye la amplitud de la onda transmitida, por otro lado, el ángulo que lo conforma constituye la fase, tal como se aprecia en el literal (b) de la figura arriba expuesta.

- **16QAM:** envía bits cuatro a la vez, para ello utiliza diez y seis (16) estados de distintas amplitudes y fases.
- **64QAM:** envía bits seis a la vez, para ello utiliza sesenta y cuatro (64) estados de distintas amplitudes y fases.

La utilización de los distintos esquemas de modulación, van de la mano con los requisitos de QoS que requieren ciertos servicios, toda vez que requerimientos que requieran mayor velocidad, mayor orden requerirá las modulaciones.

En la Tabla 5 se expone las consideraciones relevantes referentes al esquema de modulación.

Tabla 5: Esquemas de modulación

	Modulación		
	QPSK	16QAM	64QAM
Número de Vectores	4	16	64
Número de Amplitudes	1	3	9
Número de Fases	4	12	52
Número de Bits por símbolo	2	4	6
Baudios	$V_{tx} / 2$	$V_{tx} / 4$	$V_{tx} / 6$
Eficiencia Espectral teórica [bps / Hz]	2	4	6
BER para SNR en dB	10^{-7} a 12dB	10^{-7} a 16dB	10^{-7} a 20dB

De esta tabla podemos realizar el siguiente análisis:

- Dado que la modulación de QAM, modula en fase y en amplitud, es necesario exponer éstas variables, es así que; QPSK, 16QAM y 64QAM cuentan con: 1 y 4, 3 y 12, y; 9 y 52 amplitudes y fases respectivamente.
- Referente al número de bits por símbolo, QPSK, 16QAM y 64QAM cuentan con 2, 4 y 6 bits respectivamente, que expresada en baudios viene a ser la mitad, un cuarto y un sexto de la velocidad de transmisión. Concluyendo que la velocidad de transmisión comparada con la del símbolo en QPSK, 16QAM y 64QAM es el doble, cuatro veces y 6 veces respectivamente.
- La modulación de 64QAM cuenta con la eficiencia espectral superior a la de 16QAM y QPSK.
- La correlación entre los números de bits errados y transmitidos se le conoce como BER; es así que en la tabla arriba expuesta se puede apreciar que los esquemas de modulación cuentan con BER de 10^{-7} ; no obstante, las condiciones señal a ruido son distintas, es así que; para QPSK, 16QAM y 64QAM cuentan con 12, 16 y 20 dB respectivamente. De este ejemplo práctico se concluye que la modulación para 64QAM con una relación señal / ruido de orden 20 dB es 100 veces más potente la señal que la del ruido; lo que significa que no se tendrán inconvenientes al momento de demodular y transmitir la información requerida.

La Figura 73 se puede exponer un ejemplo representativo de lo analizado.

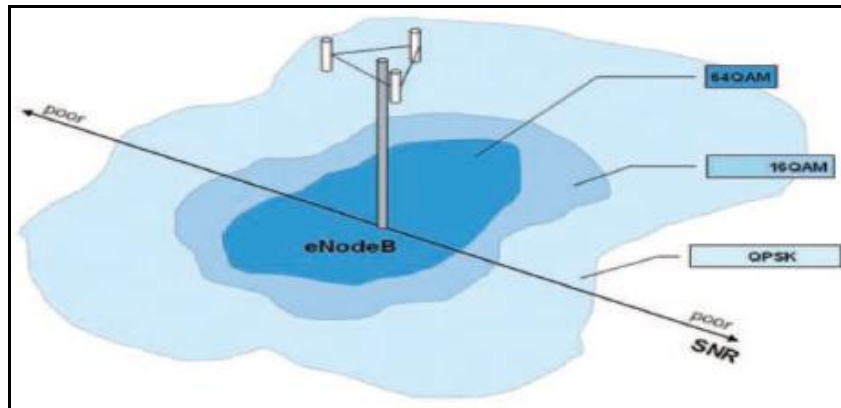


Figura 73: Esquemas de modulación utilizados en función de la SNR [52]

Se concluye que, a menor distancia existente entre el equipo de usuario y el eNB su velocidad de transmisión incrementará toda vez que hace uso de manera eficiente su esquema de modulación.

En la Tabla 6 se exponen los esquemas de modulación por canales físicos para los enlaces de bajada y subida (downlink y uplink) de las tecnologías que son sujetas del presente estudio.

Tabla 6: Esquemas de modulación utilizados por los canales físicos

Enlace	Canal físico	Esquema de modulación
Downlink	PBCH	QPSK
	PDCCH	QPSK
	PDSCH	QPSK, 16QAM, 64QAM
	PMCH	QPSK, 16QAM, 64QAM
	PCFICH	QPSK
	PHICH	QPSK
Uplink	PUCCH	QPSK, BPSK
	PUSCH	QPSK, 16QAM, 64QAM

De la tabla arriba expuesta, se puede concluir que:

- Los canales físicos de control tanto para uplink como para downlink utilizan la modulación QPSK, a excepción de PHICH en el enlace downlink que hace uso de BPSK.

- También se puede apreciar ambos enlaces (uplink y downlink) sus canales físicos de tráfico utilizan las modulaciones de QPSK, 16QAM y 64QAM.

Finalmente, el mecanismo de selección del mejor esquema de modulación que utilice LTE como LTE – Advanced dependerá específicamente del estado del canal de radio al efectuarse la transmisión.

4.7. COMPARACIÓN DE LA VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN Y LA EFICIENCIA ESPECTRAL [13], [21], [36], [52] - [58]

4.7.1. VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN PROMEDIO

A pesar que la velocidad de transmisión teórica o pico son referentes, la velocidad de transmisión promedio para ambas tecnologías es más relevante, toda vez que indica el provecho actual de la red, así como también, son determinantes para la estimación de la capacidad que son requeridas por los enlaces del sistema.

Las velocidades de transmisión promedio se estiman mediante simulacros, misma que se puede apreciar en la Figura 74.

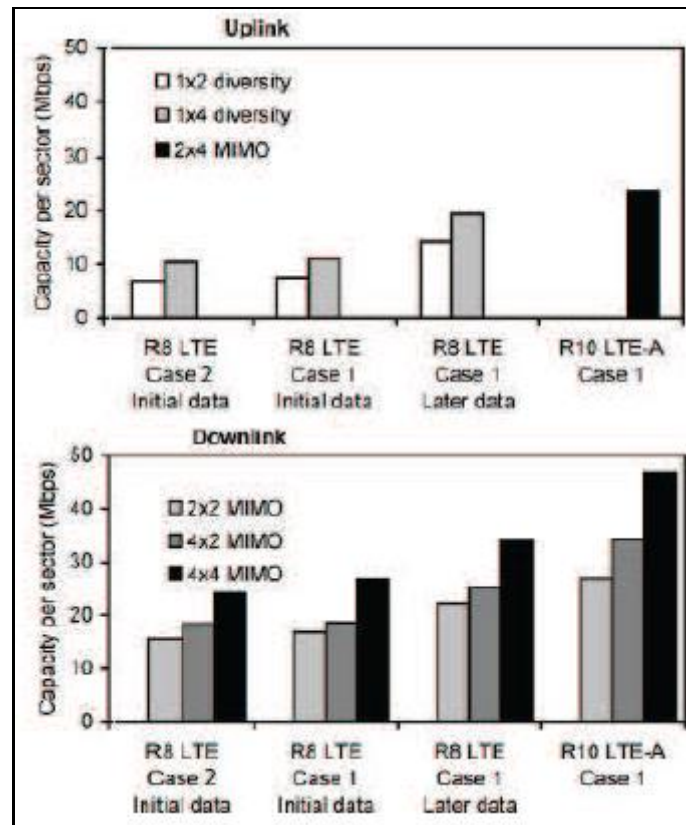


Figura 74: Capacidad por sector en una macrocelda con un ancho de banda de 10 MHz [52]

De la figura arriba expuesta, se puede realizar el siguiente análisis:

- Los resultados de la simulación se obtuvieron, tomando en cuenta los siguientes parámetros que son:
 - Se halla en un ambiente outdoor la estación base.
 - Equipo de usuario (teléfono móvil) se encuentra en un ambiente indoor.
 - El grosor de las paredes provoca pérdida de 20 dB aproximadamente en la señal recibida.
 - Dos GHZ para la frecuencia de portadora.
 - Las estaciones base cuentan con un distanciamiento de 500 y 1732 metros para el caso uno y dos respectivamente.
 - Modo de transmisión FDD.
 - Ancho de banda de 10 MHz.

- Finalmente, se concluye que en LTE con 10 MHz de ancho de banda en una macrocelda la velocidad de transmisión máxima es de alrededor de 35 Mbps utilizando MIMO 4X4 para el enlace de bajada, y de 20 Mbps utilizando MIMO 1x4 para el enlace de subida, mientras que para LTE – Advanced existe un incremento de alrededor de 48 y 25 Mbps por sector en los enlaces de bajada y subida respectivamente.

En la Figura 75 se puede apreciar los resultados que se generan en el borde de la macrocelda.

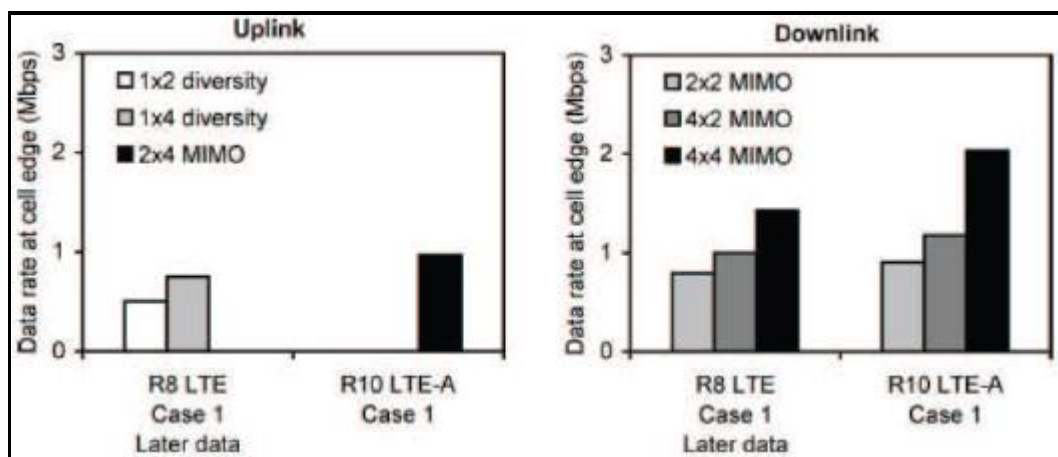


Figura 75: Velocidad de transmisión promedio en el borde de una celda por usuario asumiendo 10 usuarios por sector en 10 MHz de ancho de banda [52]

De la figura arriba expuesta, se puede realizar el siguiente análisis:

- En LTE un equipo de usuario puede alcanzar en el enlace de bajada 1,4 Mbps en su velocidad de transmisión con MIMO de 4x4, mientras que en el enlace de subida alcanzaría 0,8 con MIMO de 1x4.
- Comparando los resultados obtenidos en la Figura 74, asumiendo por sector diez usuarios, la velocidad de promedio por cada usuario sería aproximadamente 3,5 y 2 Mbps en los enlaces de bajada y subida respectivamente.

- Referente a LTE – Advanced en la Figura 74, se aprecia que cuenta con 48 Mbps la velocidad por cada sector con MIMO 4X4 en el enlace de bajada y de 25 Mbps con MIMO 2x4 en el enlace de subida. Al analizar los resultados en el borde de la celda, desplegados en la Figura 75 se obtiene una velocidad de transmisión de 2 y 1 Mbps en los enlaces de bajada y subida respectivamente. Del análisis realizado en LTE, se concluye que en LTE – A se obtiene resultados iguales en la velocidad de transmisión promedio en el borde de una macrocelda.

4.7.2. EFICIENCIA ESPECTRAL PROMEDIO Y EN EL BORDE DE LA CELDA

En las siguientes figuras, se puede apreciar los escenarios de evaluación:

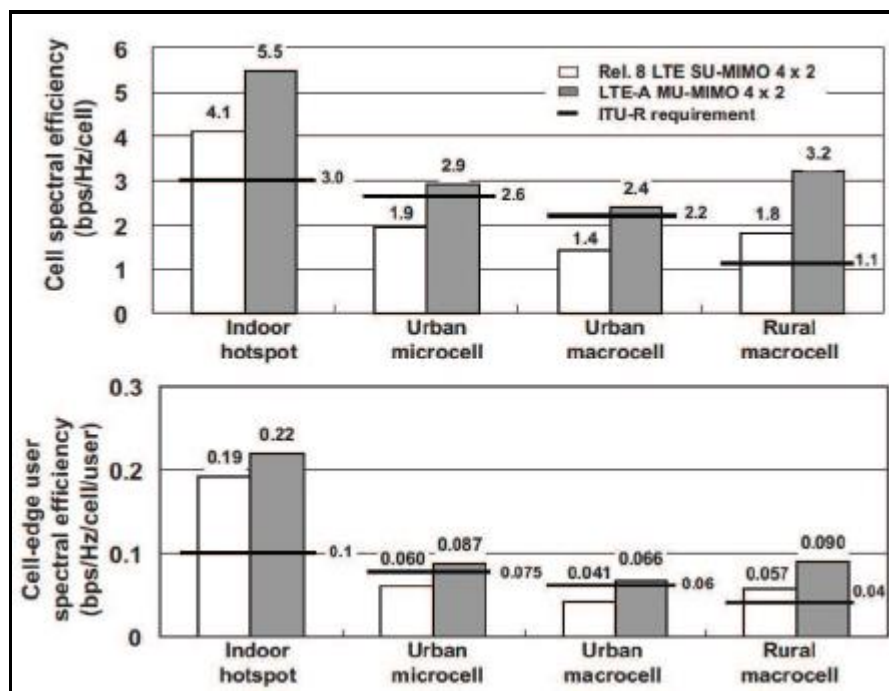


Figura 76: Eficiencia espectral promedio y en el borde de la celda para el enlace de bajada en diferentes escenarios de acuerdo a la ITU-R [21]

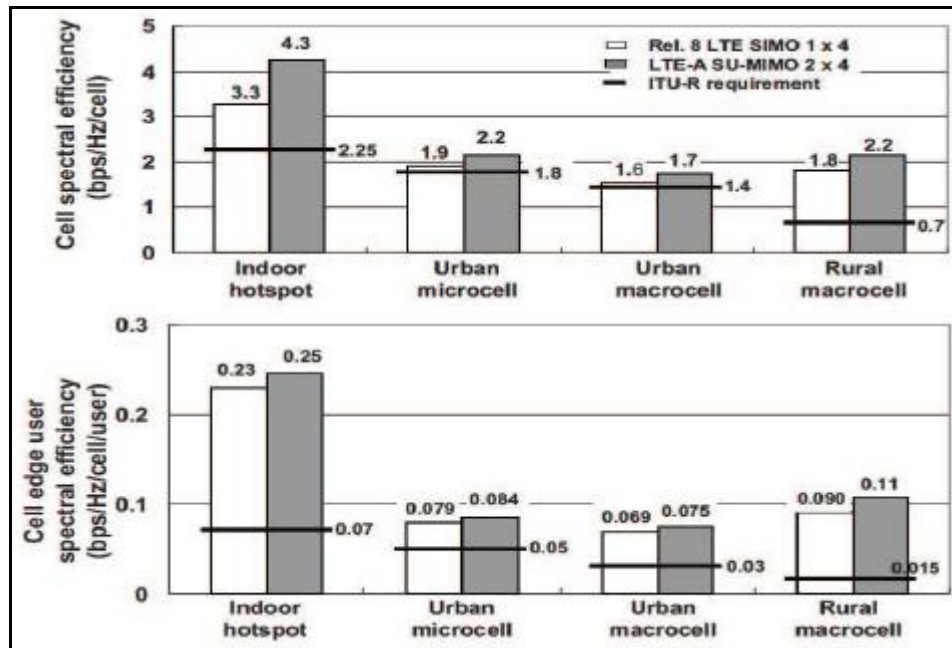


Figura 77: Eficiencia espectral promedio y en el borde de la celda para el enlace de subida en diferentes escenarios de acuerdo a la ITU-R [21]

De las figuras expuestas, podemos realizar el siguiente análisis:

- De los cuatro escenarios (indoor hotspot, microcelda urbana, macrocelda urbana y macrocelda rural), existen diagramas de barras, cada una de ellas representan mediciones de la eficiencia espectral que corresponden a una celda, siendo éstas las siguientes:
 - Primera: LTE en SU-MIMO 4X2
 - Segunda: LTE – A en MU – MIMO 4X2
 - Tercera: Se refiere a requisitos definidos por ITU-R.
- En el enlace de bajada el promedio de la eficiencia espectral en LTE, así como en el borde de la celda superan los límites definidos por la IMT – Advanced, en los siguientes escenarios: macrocelda rural e indoor hotspot. En el caso del enlace de subida se aprecia que supera los límites definidos en todos los escenarios.
- A diferencia de LTE, en LTE – Advanced los datos conseguidos en el borde de la celda y la eficiencia espectral promedio y tanto para el enlace de

bajada como el de subida supera en todos los escenarios, considerándose 4G.

4.8. COMPARACIÓN DE TÉCNICAS DE MÚLTIPLES ANTENAS ^{[13], [21], [36], [52] - [57]}

LTE y LTE – Advanced trabajan bajo las siguientes técnicas: multiplexación espacial, diversidad de transmisión / recepción y clasificación de haces de radiación. La forma de acceder en el canal de radio es mediante MIMO y es utilizada por ambas tecnologías para los enlaces de: bajada y subida a través de distintas parametrizaciones y modo de operación. Así mismo, el número máximo de codewords utilizados por ambas tecnologías es dos.

En la Tabla 7 podemos apreciar los diferentes arreglos de antenas en SU-MIMO para el enlace de bajada:

Tabla 7: Configuraciones SU-MIMO para el enlace de bajada de LTE

MIMO	1 LAYER	2 LAYER	3 LAYER	4 LAYER	CODEWORD
2X1	SI	NO	NO	NO	Un codeword
2X2	SI	SI	NO	NO	Dos layers con dos codewords
2X3	SI	SI	NO	NO	Dos layers con dos codewords
2X4	SI	SI	SI	SI	Dos a cuatro layers con dos codewords

De la tabla arriba expuesta, podemos realizar el siguiente análisis:

- LTE trabaja máximo con 4 layers y referente al número de corewords 1 o 2, y; hasta cuatro puertos de antenas en total.
- La configuración perfecta en SU-MIMO estaría dada por 4x4, en el eNB y el UE.

Es posible trabajar también con MU-MIMO 4x4; cuyos arreglos generalmente está dada por la ubicación de las cuatro antenas en el eNB y dos opciones que son:

- Primera: Cada para de las cuatro antenas son asignadas a dos UE diferentes.

- Segunda: Cada UE cuenta con una única antena.

En LTE al trabajar con MU-MIMO, puede darse que, el eNB soportaría dos o cuatro antenas, y del lado del UEs con una o dos antenas como máximo, dándose estas composiciones: MU –MIMO 4x2 o MU –MIMO 4x4.

Mientras tanto en LTE – A puede darse las siguientes composiciones: MIMO 8x8 en el enlace de bajada y MIMO 4x4 en el de subida, resaltándose que en esta tecnología se efectúa en primera ocasión SU-MIMO tomando en cuenta 4 antenas como máximo en el UE, situación que no se presenta en LTE.

LTE – Advanced cuenta con 9 modos de transmisión en el enlace de bajada comparado con los 7 que cuenta LTE, para ello es necesario el TM9 para operar con MIMO 8x8. En el caso del enlace de subida, LTE- A hace uso del modo TM2 a fin de realizar su operación mediante MIMO 4x4, a diferencia de TM1 que hace uso LTE.

Un aspecto relevante es entender como las señales son precodificadas por ambas tecnologías, para ello vamos a representar mediante la Figura 78 como se efectúa este proceso:

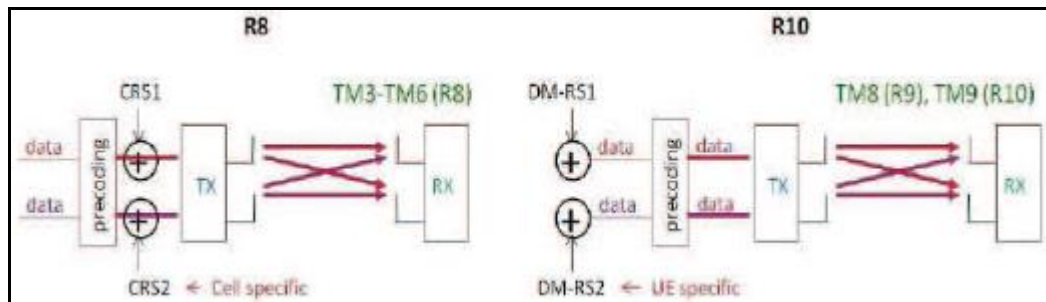


Figura 78: Precodificación de señales en LTE y LTE – Advanced [48]

De la figura arriba expuesta, podemos realizar el siguiente análisis:

- Las señales CRS en LTE se añaden a la precodificación posteriormente, situación que no sucede en LTE – A, toda vez que las señales son añadidas previo a la precodificación.
- La explicación del proceso de precodificación posterior o previo a radica en que las señales de referencia en LTE utilizadas señalan los argumentos

definidos por la celda, siendo no necesaria la precodificación de dichas señales, toda vez que el UE sabe anticipadamente las condiciones en la que se halla la celda. Situación contraria acontece en LTE – A, toda vez que las señales de referencia son precodificadas ya que son específicas de un determinado UE, siendo acompañadas de flujos de datos correspondientes a cada usuario.

- Las señales de referencia en ambas tecnologías son:
 - LTE: en el enlace de bajada las CRSs, mientras que en el enlace de subida son: DM-RS y SRS.
 - LTE – Advanced: en el enlace de bajada se aumentan dos RSs siendo estas las siguientes: CSI-RS y DM-RS; mientras que en el enlace de subida son las mismas señales que utiliza LTE, es decir: DM-RS y SRS.

4.9. COMPARACIÓN DE CATEGORÍAS DE EQUIPO DE USUARIO ^[13], [21], [36], [52] - [58]

En la Figura 79, se expone las categorías de equipos de usuario para ambas tecnologías:

Category		1	2	3	4	5
Peak rate Mbps	DL	10	50	100	150	300
	UL	5	25	50	50	75
Capability for physical functionalities						
RF bandwidth		20MHz				
Modulation	DL	QPSK, 16QAM, 64QAM				
	UL	QPSK, 16QAM				QPSK, 16QAM, 64QAM
Multi-antenna						
2 Rx diversity		Assumed in performance requirements.				
2x2 MIMO		Not supported	Mandatory			
4x4 MIMO		Not supported				Mandatory

(a) LTE

	UE category		
	6	7	8
Approximate supported downlink data rate (Mbps)	300	300	3000
Approximate supported uplink data rate (Mbps)	50	100	1500
Number of downlink MIMO layers supported	2 or 4	2 or 4	8
Number of uplink MIMO layers supported	1, 2 or 4	1, 2 or 4	4
Support for 64QAM modulation in downlink	✓	✓	✓
Support for 64QAM modulation in uplink	✗	✗	✓

(b) LTE – Advanced

Figura 79: Categorías de equipos de usuario de LTE y LTE – Advanced [21]

De la figura arriba expuesta, se puede realizar el siguiente análisis:

- En LTE los valores expuestos especifican a 20 MHz de ancho de banda; las categorías de los terminales señalan 5; y, por cada una de ellas se determina la siguiente información: en cada enlace se determina su velocidad de transmisión pico, el uso de técnicas de múltiples antenas, y el esquema de modulación.
- En LTE – A cuenta con 3 categorías adicionales a las mencionadas en LTE, éstas son: 6, 7 y 8. Se puede apreciar que la categoría ocho establece una combinación de agregar portadoras con 5 componentes, cada componente con la capacidad de 20 MHz mediante MIMO 8x4, alcanzado una velocidad de transmisión de 3 Gbps en el enlace de bajada y 1.5 Gbps en el enlace de subida.
- Finalmente, se concluye que las categorías de equipos de usuarios por ambas tecnologías son compatibles, evitando así contratiempos y mitigando cualquier tipo de problemas al momento de comunicarse entre los usuarios que utilicen sus respectivos dispositivos y éstos correspondan a diferentes tecnologías.

Conforme menciona la publicación realizada el 12 de febrero de 2016 por GSA – Global mobile Suppliers Association; donde reporta el crecimiento del ecosistema LTE refiriéndose a dispositivos LTE FDD y TDD (TD-LTE); siendo aproximadamente 4.416 dispositivos de usuario, confirmando el crecimiento anual de 67%. Un aspecto fundamental es que el 98% de los teléfonos inteligentes LTE multimodo están en la capacidad de operar en al menos una tecnología 3G incluyendo LTE y alrededor del 50% de los teléfonos LTE operan en 42 Mbps DC-HSPA – Redes.

4.10. COMPARACIÓN DE SERVICIOS Y APLICACIONES [13], [21], [36], [52] - [58]

En el ámbito de servicios y aplicaciones, ambas tecnologías puedes ofrecer servicios a los usuarios en el ámbito de productividad, comercialidad, entretenimiento y comunicación, utilizando las mismas aplicaciones. Es decir, la principal de una tecnología de la otra es específicamente la velocidad con la que lo ejecutan dichos servicios. Es así que, LTE – Advanced es claro vencedor en este tópico, toda vez que las velocidades supera notablemente a las ofrecidas por LTE.

Entre los principales servicios móviles que ofrecen ambas tecnologías, citamos las siguientes:

- Videoconferencia en tiempo real, sin interrupciones.
- Transmisiones de eventos en vivo en alta calidad mediante redes sociales.
- Descarga de archivos pesados que incluyen contenido multimedia en pocos segundos.
- Comunicación ininterrumpida para aquellos usuarios que mantienen constante movimiento.
- Servicios en la nube.

A continuación, se procederá a detallar los servicios que ofrecen ambas tecnologías en los diferentes ámbitos:

- *Equipos de usuario, aplicaciones y servicios:* Estos equipos son considerados inteligentes debido a lo robusto en las características del equipo como: sistema operativo, procesadores, memoria, capacidad de almacenamiento, antenas, pantallas touch screen, baterías entre otros. Así mismo, gran cantidad de aplicaciones multimedia pueden ser instalados en dichos equipos, cubriendo prácticamente varias aristas en el mercado.
- *Internet:* Se refiere a los servicios que se ofrece mediante la web, permitiendo establecer la comunicación, interoperabilidad, colaboración, consulta e investigación, entre otros. Como ejemplos de uso podemos citar: blogs, noticias, chat, juegos, TV por internet, Streaming de videos, redes sociales, entre otros.
- *Navegación y localización:* Ofrece servicios en el ámbito geográfico tales como: localización, información geográfica, almacenamiento y gestión de información de usuarios en la red.
- *Transporte:* Presta servicios en los vehículos tales como: entretenimiento a través del acceso a radio y televisión, monitoreo del vehículo, proporciona información respecto al tráfico proporcionando rutas alternativas y acceso al internet entre otros.
- *Bancario:* Contempla los servicios que prestan las entidades bancarias y sector financiero tales como: tarjetas de crédito, máquinas expendedoras, transacciones bancarias, internet móvil entre otros.
- *Salud:* Involucra el acceso a las bases de datos de los sistemas hospitalarios, odontológicos, clínicas entre otros. Así mismo, permite a los pacientes consultar y recibir asistencia técnica mediante videoconferencia, recetas. El uso de aplicaciones móviles que permiten tener una salud saludable en notificaciones como: dietas, ejercicios, ritmo cardiaco entre otros.

- *Periodismo:* Ofrece el servicio de noticias y acontecimientos televisivos en vivo, la publicación de estos eventos se lo puede realizar en: periódicos, revistas, blogs y radio. La ventaja radica que el usuario puede acceder a la información histórica de los eventos suscitados cuando lo requiera.
- *Seguridad y control:* A través de la instalación de varios dispositivos que trabajan conjuntamente con aplicaciones; permiten a los usuarios contar con sistemas de seguridad y control robustos, mismos que son monitoreados en tiempo real, así como la obtención de los reportes correspondientes.
- *Aplicaciones del consumidor:* En el hogar la integración e interconexión de los dispositivos electrónicos es un hecho, dispositivos tales como: equipos de computación, impresoras, audio, TV, refrigeradoras, consola de videojuegos, sistemas de vigilancia entre otros son plataformas robustas que son de acceso mediante el móvil del usuario a fin de monitorizarlos y recibir información de las diferentes notificaciones que los dispositivos mencionados pueden emitir.

4.11. COMPARACIÓN DE REDES DESPLEGADAS Y LANZAMIENTO COMERCIAL [13], [21], [36], [52] - [60]

En la Figura 80 se aprecia el horizonte de la implementación de la tecnología LTE en los diferentes continentes. Conforme lo menciona GSA en base a sus estudios realizados hasta julio del 2015, establece que: 422 redes LTE han sido lanzadas comercialmente en 143 países, de ellos 106 fueron lanzados en el 2014. Así mismo, se pronostica que al finalizar el año 2015 se lanzarían 460 sistemas LTE. Otros datos relevantes que proporciona GSA son:

- 638 operadoras se encuentran comprometidas en 181 países.
- Más del 44% de redes LTE han sido implementadas en la banda 1800 MHz.
- 59 operadoras han puesto en marcha LTE TDD en 35 países.
- 25 operadoras han puesto en marcha VoLTE basado en voz HD.

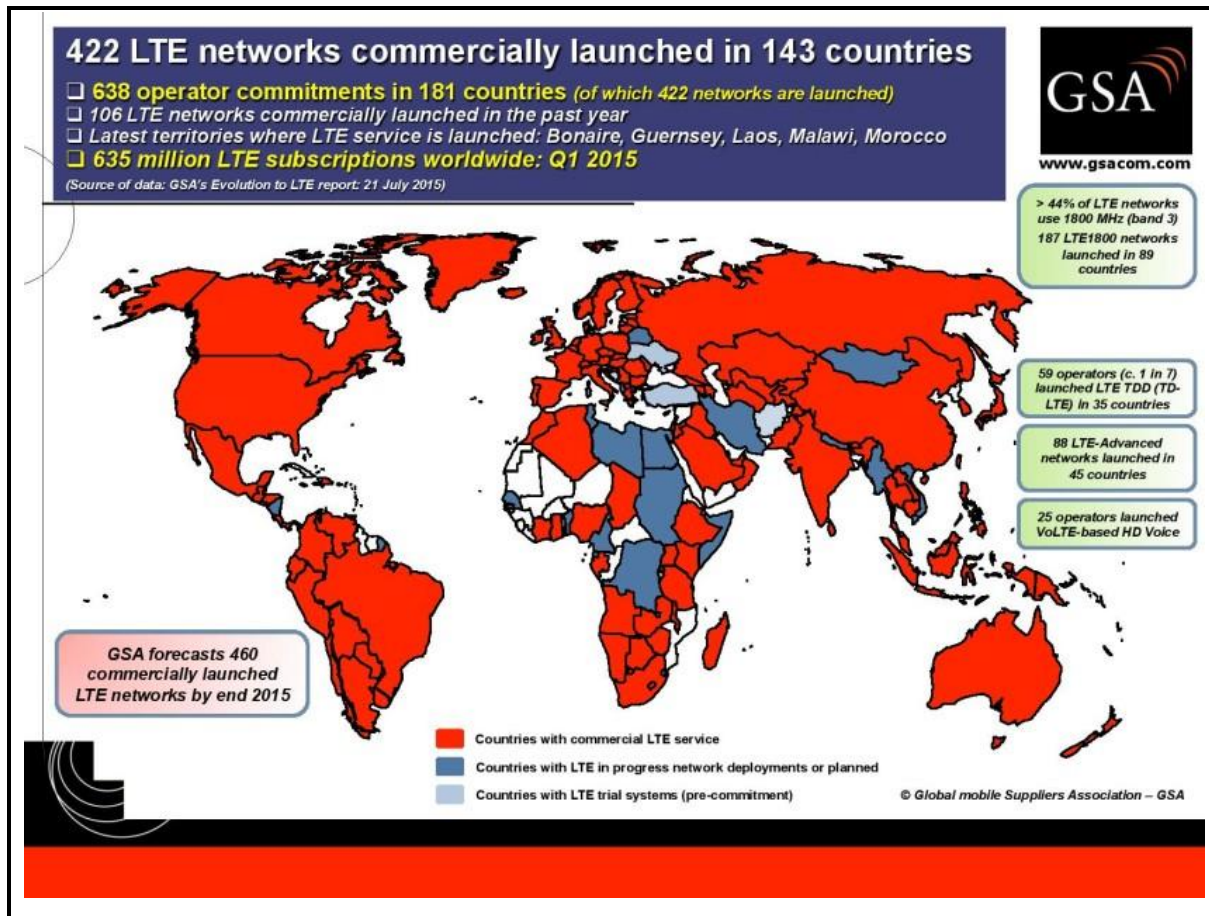


Figura 80: Redes LTE en el mundo [57]

Mientras que en la Figura 81 se puede apreciar el horizonte de la implementación de la tecnología LTE - Advanced en los diferentes continentes. Conforme lo menciona GSA en base a sus estudios realizados hasta julio del 2015, establece que: 88 redes LTE - Advanced han sido lanzados comercialmente en 45 países; y, aproximadamente 131 operadoras están invirtiendo en alrededor de 60 países.

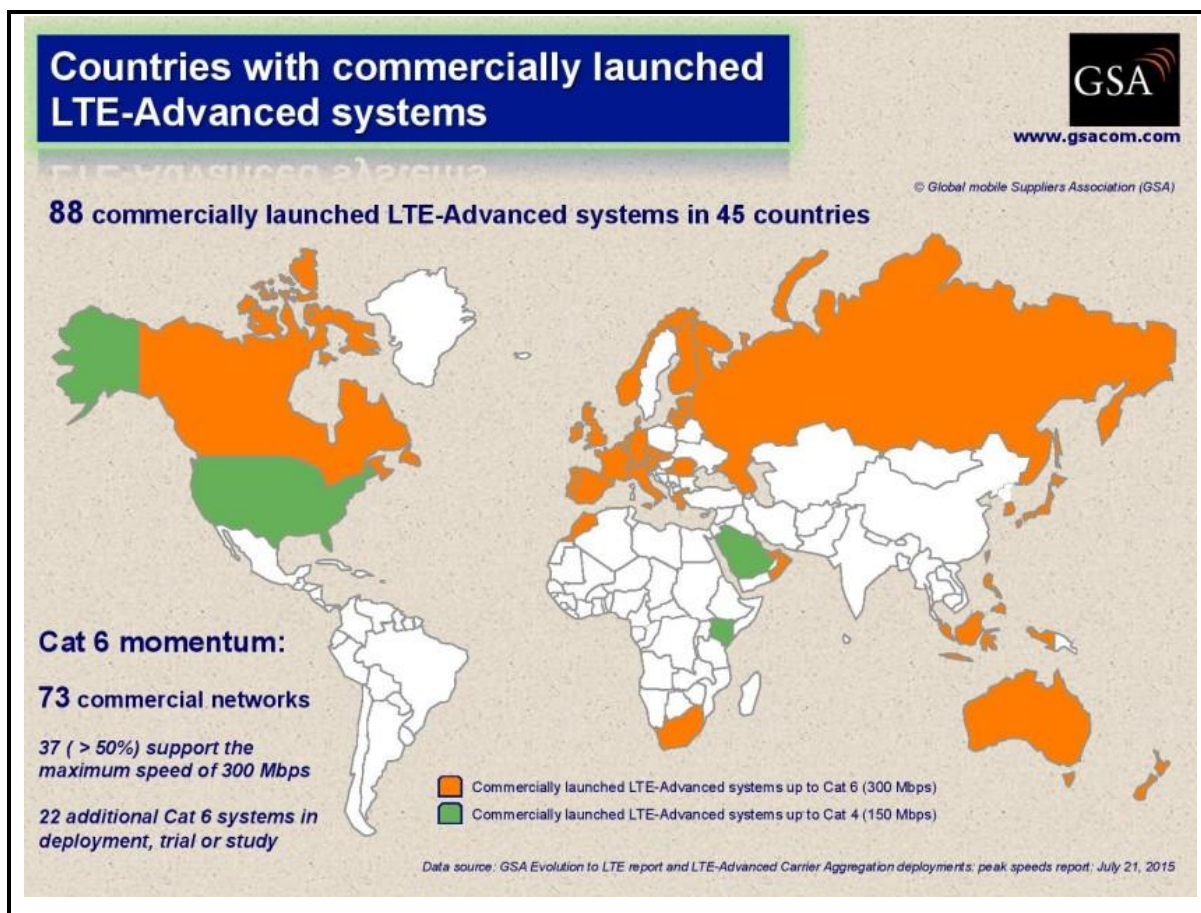


Figura 81: Redes LTE - Advanced en el mundo [57]

A pesar que, la tecnología LTE está presente desde hace siete años, en lo que respecta a nuestra región inició en Brasil en el 2011 y en nuestro país inicio a finales del 2013. A pesar de contar con una conexión que es consideraba la más rápida de la región, 17 Mbps, no cuenta con la mayor cobertura en nuestro territorio, a diferencia de Uruguay que se encuentra entre los 10 países con mejor cobertura en todo el mundo, conforme así lo señala los estudios realizados por OpenSignal.

A nivel mundial, se determina que el país que cuenta con mejor cobertura y velocidad de transmisión es Singapur, siendo su velocidad promedio de 37 Mbps, de cerca le sigue Nueva Zelandia con 29 Mbps y Hungría e Israel con 28 Mbps.

4.12. CONCLUSIONES

- LTE – Advanced ha logrado incrementar la capacidad de la red y cobertura gracias a los relay nodes que complementan a las macro – celdas.

- Las categorías de los equipos de usuario son 5 y 8; para LTE y LTE – Advanced respectivamente. En LTE dichos equipos soportan 20 MHz de ancho de banda, cuyos esquemas de modulación son 64QAM, 16QAM y QPSK en el enlace descendente, mientras que para el ascendente son 64QAM y 16QAM. En LTE – Advanced utilizan a partir de la categoría sexta el esquema de modulación 64QAM.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- La primera red comercial LTE apareció en el año 2009, no obstante, a pesar de haber estado conformado el grupo IMT-Advanced nombrado por la ITU para dicha fecha aún no había existido un pronunciamiento oficial respecto a los requisitos que debían cumplir a fin de ser considerados tecnologías 4G. Se concluye que LTE como tal no es una tecnología de cuarta generación (4G), toda vez que no cumple con los requisitos definidos por la entidad competente, no obstante, se ha promocionado a nivel mundial como LTE 4G, esto obedece a dos factores fundamentales que son: se vende más y la fundamental, es que la IMT-Advanced aprobó que los candidatos a ser evolucionados a 4G, tal es el caso de LTE, se publiciten como 4G. Por su parte LTE – Advanced, su nombre lo dice todo, es una tecnología 4G.
- El organismo 3GPP a través de la evolución de las tecnologías móviles se ha caracterizado por no crear estándares cerrados, es así que, LTE empezó con el Release 8 y evolucionó al Release 10 o también conocida como su extensión LTE – Advanced, el estudio determina que ésta última obtiene ventajas sobre su predecesora, tales como:
 - Utilización de bandas frecuencias por parte de LTE – Advanced sobre LTE. Se debe resaltar que LTE – Advanced cuenta con cinco bandas de frecuencia adicionales en dúplex FDD y una banda en dúplex TDD.
 - En ambas tecnologías su arquitectura está conformada por tres redes que son: EPC, E – UTRAN y servicios externos. El plus de LTE – Advanced es que en E – UTRAN incorpora en su arquitectura el relay nodes.

- Ambas tecnologías utilizan QPSK, 16QAM y 64QAM a fin de modular; el factor de cual esquema será utilizado está directamente relacionado con el nivel de SNR con la que se cuente, mientras mayor sea el SNR serán utilizados los esquemas de modulación de mayor orden; no obstante, esto conlleva a un problema que si bien es cierto permite aumentar la velocidad de transmisión, sus puntos de constelación que se crean se acercan más, conllevando a detectar erróneamente un determinado símbolo.
 - Ambas tecnologías utilizan esquemas de acceso OFDMA y SC-FDMA para los enlaces de bajada y de subida respectivamente, esquemas que a su vez utilizan OFDM a fin de alcanzar la multiplexación. Existen un grado de particularidad en LTE – Advanced, toda vez que su esquema de acceso es clustered DFT-S-OFDMA siendo considerablemente el mejoramiento de SC-FDMA.
 - Ambas tecnologías ofrecen aplicaciones y servicios que demanda de mayor ancho de banda, así como también de velocidad de transmisión, se ha corroborado y expuesto que, estas tecnologías están siendo bien aprovechadas por la mayoría de sectores a nivel mundial.
- Se concluye que nuevos modos de transmisión son agregados en LTE – Advanced, lo que permite incorporar nuevas señales de referencia, dichos modos son: TM9 y TM2 para el enlace de bajada y subida respectivamente; incorporándose las señales CSI-RS y DM-RS en TM9 y notando una mejora considerable en las señales DM-RS y SRS para TM2.
 - Existen varias alternativas a fin de satisfacer la demanda debido a la incorporación de nuevos usuarios en la telefonía móvil, éstas son: Acceder a una mayor cantidad de espectro radioeléctrico, utilizar una tecnología espectralmente más eficiente o desplegar más estaciones base a fin de reducir la superficie cubierta por cada una de ellas, concluyendo que, ésta

última alternativa se considera la más viable debido a que puede ser implementada a corto plazo.

- Desde la perspectiva de LTE y LTE – Advanced, el utilizar las frecuencias bajas, así como las que ya se encuentran asignadas se convierte en un factor relevante cuando se trata de reducir costos, concluyendo que ésta aprovecha la infraestructura y estaciones base que son utilizadas por tecnologías antecesoras.
- El estudio determina que la transmisión y recepción efectuada a través de coordinated multipoint cuya función principal es la coordinación dinámica entre las estaciones base logra alcanzar los siguientes objetivos que son: incrementa el rendimiento y la cobertura, mejora notablemente la señal recibida en el equipo del usuario específicamente en los límites de cobertura de una celda y reduce la interferencia existente en el co-canal.
- Se concluye que LTE – Advanced utiliza la técnica de agregación de portadora, misma que permite trabajar hasta 100 MHz de ancho de banda a través de la utilización de componentes de portadora alcanzando hasta 5, cada una de ellas con capacidad de 20 MHz; para ello se permite el uso del espectro contiguo o no o a su vez la adición de espectros de distintas bandas de frecuencia.
- El estudio determina que LTE a fin de alcanzar las velocidades de transmisión máxima de 300 y 75 Mbps en los enlaces de bajada y subida respectivamente, hace uso de 20 MHz de ancho de banda y técnicas de múltiples antenas como lo es MIMO 4x4, siendo 15 y 3.75 bps/Hz su eficiencia espectral en los enlaces correspondientes. En LTE – Advanced las velocidades de transmisión máxima son de 3000 y 1500 Mbps en los enlaces de bajada y subida respectivamente, para el efecto a fin de alcanzar dichas velocidades, en el enlace de bajada se hace uso de 100 MHz de ancho de banda compuesta por componentes de portadora siendo 5 en total, con 20 MHz cada una de ellas y técnicas de múltiples antenas como

lo es SU-MIMO 8x8, mientras que en el enlace de bajada las técnicas múltiples de antenas está dada por SU-MIMO 4x4; siendo su eficiencia espectral de 30 y 15 bps/Hz en los enlaces correspondientes.

- Se concluye que LTE se encuentran expandiendo a nivel mundial, a tal punto que en varios países tienen tanta presencia como las 3G que fueron sus predecesoras. A pesar que nuestro país ingresó tarde al mundo de LTE siendo en diciembre del 2013 a través de la operadora CNT, existen actualmente dos operadoras adicionales que son: Movistar y Claro; operadoras que tienen como misión cubrir todo el territorio ecuatoriano.

5.2. RECOMENDACIONES

- A fin de contar con información actualizada respecto a estándares, normas, evolución o creación tecnologías celulares entre otros, en lo que refiere a equipos de usuarios o red, se recomienda acudir a los sitios web de los organismos internacionales competentes; esto nos permitirá verificar si los proveedores de la telefonía celular ofertan sus servicios tal como lo promocionan.
- Se recomienda a los estudiantes, docentes y público en general interesados en estudiar las tecnologías de las telefonías celulares, analizar previamente las tecnologías predecesoras, esto en virtud que toda la infraestructura es utilizada por la evolución de las nuevas tecnologías, tal es el caso de LTE y LTE-A.
- Se recomienda como proyecto de tesis realizar un estudio respecto a la arquitectura, tecnología, recursos, servicios entre otros que actualmente son utilizados por las operadoras CNT, Movistar y Claro en nuestro país, para brindar el servicio de LTE – 4G, ello permitirá contar con los insumos

necesarios a fin de contar con un análisis de la viabilidad o no a futuro de la implementación de la tecnología LTE – Advanced o 5G que están siendo o han sido implementadas en otros países.

- Al existir varias alternativas a fin de satisfacer la demanda de los usuarios, se recomienda a las telefonías móviles celulares en nuestro país optar por desplegar más estaciones base a fin de reducir la superficie cubierta por cada una de ellas.
- Se recomienda como proyecto de tesis realizar un estudio técnico comparativo de las tecnologías denominadas 4G y 5G.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] El Comercio (2012), Ninguna operadora celular en el país cuenta con tecnología 4G, último acceso el 5 de febrero de 2014, en http://www.elcomercio.com.ec/negocios/operadora-celular-pais-cuenta-tecnologia_0_709729274.html
- [2] ITU (2010), La UIT prepara el terreno de las tecnologías móviles de la próxima generación (4G), último acceso el 5 de febrero de 2014, en http://www.itu.int/net/pressoffice/press_releases/2010/40-es.aspx#.UvLoXPI5N1Y.
- [3] Movistar (2012), Movistar debe retirar la publicidad de 4g hasta el 7 de junio de 2012, último acceso el 5 de febrero de 2014, en http://www.supertel.gob.ec/index.php?option=com_content&view=article&id=590:movistar-debe-retirar-la-publicidad-de-4g-hasta-el-7-de-junio-de-2012&catid=44:principales&Itemid=344.
- [4] El Comercio (2014), La red 4G llegó y la mayoría de usuarios aún sigue en 2G, último acceso 5 de febrero de 2014, en http://www.elcomercio.com.ec/tecnologia/red_4G-3G-telefonía_movil-navegacion-Supertel-Conatel-CNT_movil_0_1061893810.html.
- [5] FIGUEROA, Mario (2009). Introducción a los sistemas de telefonía celular. Argentina: Hispano Americana HASA.
- [6] 4gamericas (2014), 3G: Sistemas móviles de tercera generación, último acceso el 21 de marzo de 2014), en <http://www.4gamericas.org/index.cfm?fuseaction=page§ionid=405>.
- [7] Generaciones de celulares, características e imágenes (2014), último acceso el 21 de marzo de 2014, en <http://karenecheverriyldanielaaguirre.blogspot.com/2011/04/consulta.html>.
- [8] Hacia la tercera generación en Sistemas de Comunicación Móvil (2006), último acceso el 21 de marzo de 2014, en http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/tecuanhuehue_r_j/capitulo1.pdf.
- [9] Implementación de un sistema de ubicación y discernimiento entre tecnología celular GSM y satelital para el seguimiento de unidades móviles

- (2010), último acceso el 21 de marzo de 2014, en http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/565/SHIMABUKO_SHIMABUKURO_CESAR_SISTEMA_UBICACION_GSM_SATELITAL.pdf?sequence=1.
- [10] La evolución de la telefonía móvil (2001), último acceso el 21 de marzo de 2014, en http://www.adecom.biz/pdf/pdf_agosto2005/La%20evolucion%20de%20la%20telefon%C3%ADa%20m%C3%B3vil.pdf.
- [11] Wikipedia: Telefonía móvil 4G (2014), último acceso el 28 de marzo de 2014, en https://es.wikipedia.org/wiki/Telefon%C3%ADa_m%C3%B3vil_4G.
- [12] COLLINS, Daniel (2001). 3G Wireless Networks. Estados Unidos: McGraw-Hill Professional.
- [13] COMES, Ramon (2010), LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles, España: Fundación Vodafone.
- [14] From OFDM to OFDMA – SixtySec (2012), último acceso el 13 de febrero de 2015, en <https://www.youtube.com/watch?v=QEpxtiN8Trc&feature=relmfu>.
- [15] ARMSTRONG, Jean (2008), OFDM: From Copper and Wireless to Optical. Monash University.
- [16] LTE & IMS An Introduction (2012), último acceso el 20 de febrero de 2015, en <http://www.slideshare.net/shubhabratamukherjee1/lte-ims-intro>.
- [17] IMS VoLTE Architecture (2013), último acceso el 20 de febrero de 2015, en <http://www.3glteinfo.com/ims-volte-architecture/>
- [18] IMS: A Mobile Device Perspective (2013), último acceso el 20 de febrero de 2015, en <http://www.microwavejournal.com/ext/resources/whitepapers/July2012/IMS-Architecture-White-Paper.pdf?1344890737>.
- [19] LTE Security – How Good is it? (2015), último acceso el 10 de marzo de 2015, en https://www.rsaconference.com/writable/presentations/file_upload/tech-r03_lte-security-how-good-is-it.pdf.

- [20] 3GPP LTESecurity Aspects (2011), último acceso el 10 de marzo de 2015, en <ftp://www.3gpp.org/Information/...2011/.../DZBangalore290511.pdf>
- [21] SESIA, Stefania y otros (2011), The UMTS Long Term Evolution From Theory to Practice.
- [22] Youtube, SC-FDMA vs OFDMA – SixtySec (2012), último acceso el 1 de junio de 2015, en <https://www.youtube.com/watch?feature=endscreen&v=dr4YQAfifKA&NR=1>.
- [23] QUINTERO, Víctor y otros (2011), Sistemas MIMO, último acceso el 1 de junio de 2015, en <http://artemisa.unicauca.edu.co/~vflorez/CI/Capitulo%206.pdf>.
- [24] Tecnología MIMO (2009), último acceso el 15 de julio de 2015, en <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11579/fichero/g.+Cap%EDtulo+3++Tecnolog%EDa+MIMO.pdf>.
- [25] ROMERO, María (2013), Sistemas MIMO (Múltiples Entradas Múltiples Salidas), ultimo acceso el 15 de julio de 2015, en <http://www.slideshare.net/madeci95/sistemas-mimo>.
- [26] FERNÁNDEZ, Ignacio (2014), PLANIFICACIÓN Y DIMENSIONADO DE UNA RED LTE, último acceso el 15 de agosto de 2015, en http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/21660/Proyecto_Final_Carrera_Ignacio_Fernandez.pdf?sequence=4
- [27] TÉLLEZ, Teresa (2013), Despliegue de una red LTE en una zona rural al sureste de Madrid, en http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/18416/PFC_Teresa_Irene_Tellez_Garcia.pdf?sequence=1.
- [28] HUSSAIN, Sajid (2009), Dynamic Radio Resource Management in 3GPP LTE.
- [29] KULKARNI, Parag (2010), Radio Resource Management Considerations for LTE Femto Cells.
- [30] TATA (2013), Radio Resource Management - Radio Admission Control and Bearer Control.
- [31] WIKIPEDIA (2015), LTE Advanced, último acceso el 9 de septiembre de 2015, en https://en.wikipedia.org/wiki/LTE_Advanced.

- [32] 3GLTEINFO (2012), LTE And LTE Advanced Frequency Bands And Spectrum Allocations, último acceso el 9 de septiembre de 2015, en <http://www.3glteinfo.com/lte-and-lte-advanced-frequency-bands-and-spectrum-alloactions/>.
- [33] NAKAMURA, Takehiro (2009), Proposal for Candidate Radio Interface Technologies for IMT Advanced Based on LTE Release 10 and Beyond (LTE Advanced), último acceso el 10 de septiembre de 2015, en http://www.3gpp.org/IMG/pdf/2009_10_3gpp_IMT.pdf.
- [34] WIRELESSTELECOM (2013), LTE Advanced – Key features and differentiators, último acceso el 15 de septiembre de 2015, en <https://wirelesstelecom.wordpress.com/2013/05/28/lte-advanced-key-features-and-differentiators/>.
- [35] RADIOELECTRONICS (2012), 4G LTE Advanced Tutorial, último acceso el 15 de septiembre de 2015, en <http://www.radioelectronics.com/info/cellulartelecomms/lte-long-term-evolution/3gpp-4g-imt-lte-advanced-tutorial.php>.
- [36] QUALCOMM (2016), Delivering on the LTE Advanced promise, último acceso 1 de abril de 2016, en <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/delivering-on-the-lte-advanced-promise-.pdf>.
- [37] 3GPP (2013), Carrier Aggregation explained, último acceso 23 de octubre de 2015, en <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/101-carrier-aggregation-explained>.
- [38] ROHDE&SCHWARZ (2012), último acceso el 23 de octubre de 2015, en https://www.rohde-schwarz.com/us/solutions/wireless-communications/lte/lte-webinars/videoLTEadvancedcarrieraggregation_73017.html.
- [39] NOKIA (2015), LTE-Advanced Carrier Aggregation Optimization, último acceso el 23 de octubre de 2015, en https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=8&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjXwJ-I16XMAhVBPCYKHUTXDIwQFghIMAc&url=http%3A%2F%2Fnetworks.nokia.com%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fdocument%2Fnokia_carrier_aggre

- gation_white_paper.pdf&usg=AFQjCNFmvNVpgGVp1L4tNCKC-XNUaZfg2g.
- [40] COMWORDLSERIES (2012), Understanding LTE-Advanced Carrier Aggregation, último acceso 30 de octubre de 2015, en <https://africa.comworldseries.com/files/93031-Understanding-Carrier-Aggregation-web.pdf>.
- [41] Estudio sobre los requisitos técnicos que permitan caracterizar la cobertura con tecnología LTE necesaria para proporcionar determinados servicios de datos (2014), último acceso el 3 de noviembre de 2015, en <http://www.minetur.gob.es/telecomunicaciones/banda-ancha/cobertura/Otros%20documentos%20interes/Estudio-requisitos-tecnicos-coberturaLTE.pdf>.
- [42] PIERO, Gian (2013), Análisis del impacto del uso de técnicas de múltiples antenas en una red móvil LTE con la herramienta de simulación atoll, último acceso el 5 de noviembre de 2015, en http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/18251/PFC_-_Gian_Piero_Perrino.pdf.
- [43] RADIO-ELECTRONICS (2014), 4G LTE CoMP, Coordinated Multipoint Tutorial, último acceso el 10 de noviembre de 2015, en <http://www.radio-electronics.com/info/cellular telecomms/lte-long-term-evolution/4g-lte-advanced-comp-coordinated-multipoint.php>.
- [44] NTTDOCOMO (2012), MIMO and CoMP in LTE-Advanced, última visita el 14 de noviembre de 2015, en https://www.nttdocomo.co.jp/english/binary/pdf/corporate/technology/rd/technical_journal/bn/vol12_2/vol12_2_020en.pdf.
- [45] IJCST (2012), Coordinated Multipoint (CoMP) Reception and Transmission for LTE-Advanced/4G, última visita el 18 de noviembre de 2015, en https://www.nttdocomo.co.jp/english/binary/pdf/corporate/technology/rd/technical_journal/bn/vol12_2/vol12_2_020en.pdf.
- [46] RADIO-ELECTRONICS (2014), 4G LTE Advanced Relay, última visita el 20 de noviembre de 2015, en <http://www.radio->

- electronics.com/info/cellulartelecomms/lte-long-term-evolution/4g-lte-advanced-relaying.php.
- [47] LTEWORLD (2012), Introduction of Relay Nodes in LTE-Advanced, última visita el 20 de noviembre de 2015, en <http://lteworld.org/blog/introduction-relay-nodes-lte-advanced>.
 - [48] 3GPP (2013), LTE-Advanced, última visita el 20 de noviembre de 2015, en <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced>.
 - [49] VILICOM (2013), Relays in LTE-Advanced, última visita el 20 de noviembre de 2015, en <http://www.vilicom.com/uncategorized/relays-in-lte-advanced/>.
 - [50] PCWORD (2014), FAQ: How is LTE-Advanced different from regular LTE?, último acceso el 18 de diciembre de 2015, en <http://www.pcworld.com/article/2083981/faq-how-is-lte-advanced-different-from-regular-lte.html>.
 - [51] RFWIRELESS-WORD (2012), Difference between LTE and LTE Advanced, último acceso el 18 de diciembre de 2015, en <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/LTE-vs-LTE-Advanced.html>.
 - [52] COX, Christofer (2012), An introduction to LTE, LTE-ADVANCED, SAE and 4G Mobile Communications.
 - [53] 4G (2015), 4G LTE Advanced – What you need to know about LTE-A, último acceso el 15 de enero de 2016, en <http://www.4g.co.uk/4g-lte-advanced/>.
 - [54] PCADVISOR (2015), 4G vs LTE: Why you're not getting true 4G speeds, último acceso el 20 de enero de 2016, en <http://www.pcadvisor.co.uk/feature/mobile-phone/whats-difference-between-4g-lte-3605656/>.
 - [55] ROHDE&SCHWARZ (2015), LTE / LTE-Advanced Fundamentals, último acceso el 20 de enero de 2016, en https://www.rohde-schwarz.com/vn/technologies/cellular/lte/lte-technology/lte_information_52292.html.
 - [56] Main Differences between LTE & LTE-Advanced (2014), último acceso el 20 de enero de 2016, en

<http://www.slideshare.net/sabirhussain718/main-differences-between-lte-lte-advanced>.

- [57] DIGITALTRENDS (2015), último acceso 25 de enero de 2016, en <http://www.digitaltrends.com/mobile/4g-vs-lte/>.
- [58] ANDROIDAUTHORITY (2016), 4G vs LTE – what is the difference?, último acceso el 10 de abril de 2016, en <http://www.androidauthority.com/4g-vs-lte-274882/>.
- [59] OPENSIGNAL (2015), The State of LTE, último acceso el 30 de enero de 2016, en <https://opensignal.com/reports/2015/09/state-of-lte-q3-2015/>.
- [60] LANACION (2016),Cuál es el estado del 4G LTE en la Argentina, último acceso el 5 de febrero de 2016, en <http://www.lanacion.com.ar/1868192-cual-es-el-estado-del-4g-lte-en-la-argentina>.
- [61] NIVIUK (2016), LTE frequency band, último acceso 20 de febrero de 2016, en http://niviuk.free.fr/lte_band.php.